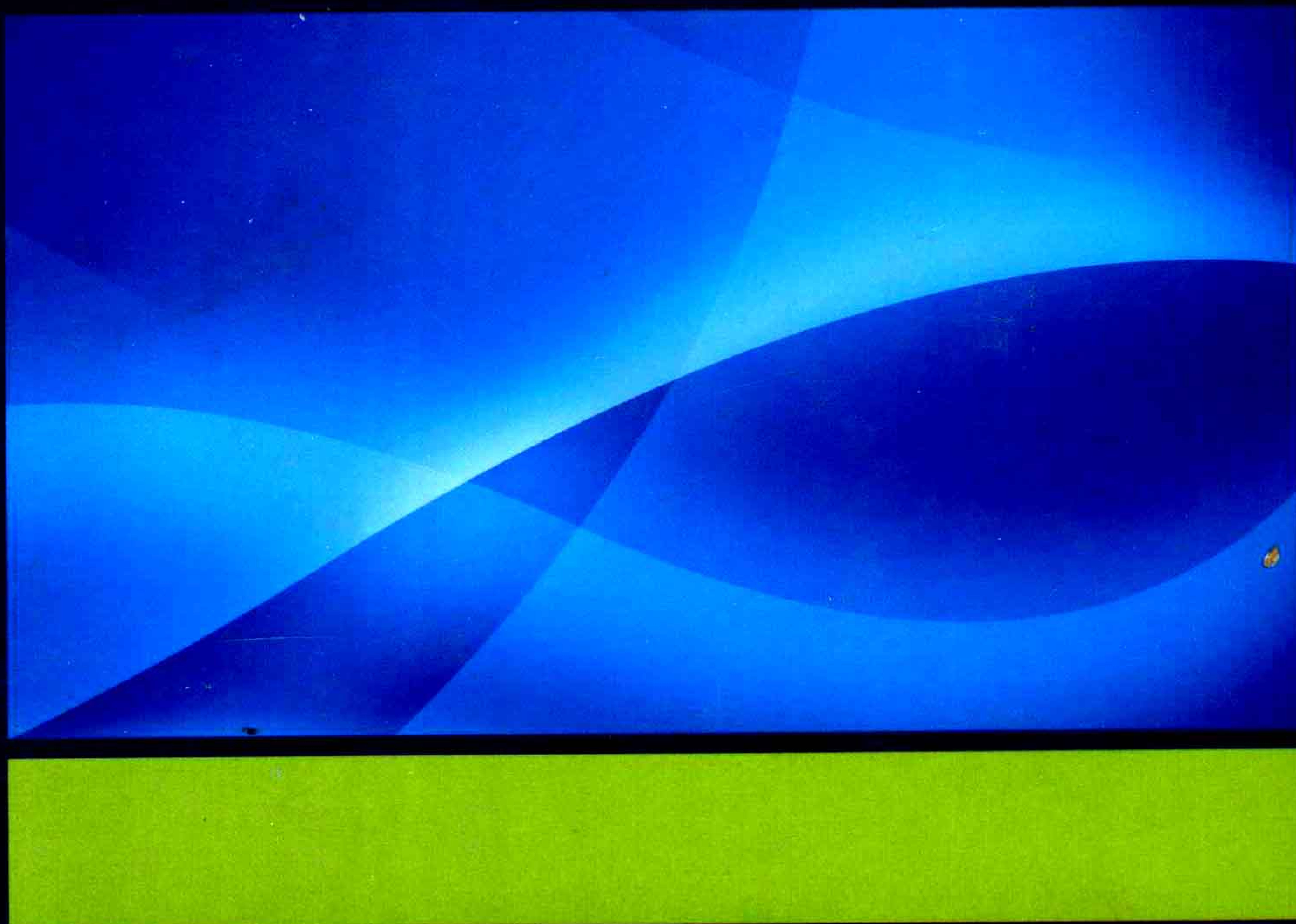
国家“十二五”重点图书船舶与海洋出版工程

英文版原著 简·埃里克·维南
(Jan Erik Vinnem)
中文版主审 陈 刚

海洋工程设计手册
—风险评估分册



原理——建模——应用

(第2版)



上海交通大學出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn





责任编辑／吴显沪
管新潮
封面设计／朱 懿
责任营销／陈 鑫

本书是第一本将量化风险评估（QRA）应用于海上设施和作业的图书。在离岸油气业，风险评估技术已经使用了30多年。随着离岸油气业拓展到新的地区以及在已有地区遇到新的挑战，风险评估技术的应用得到了迅速的发展。

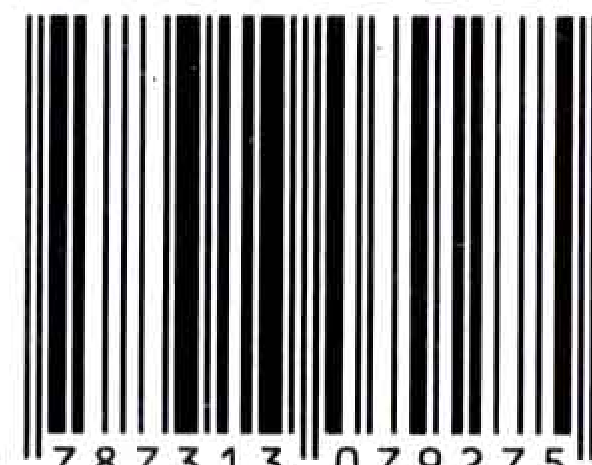
本书是进一步更新和扩充的第2版，包含了挪威离岸风险评估重大研发项目的成果，能反映出海上浮式生产设施得到大量应用的趋势。

本书首先对风险度量和风险分析方法进行深入探讨，随后的章节专门对安全和应急系统的事态加剧、逃生、撤离和救援分析方法进行论述。

书中有单独的章节对离岸结构的主要危险：火灾、爆炸、碰撞和坠落物体进行分析。还讨论了风险的缓解和控制，以及如何对量化风险评估研究进行呈现。第2版更为重视风险评估技术在海上设施作业中的应用，并且还涵盖了海上设施退役方面的内容。

书中不仅介绍了离岸风险评估的最新进展，而且确定了需要进一步发展的薄弱之处。本书为海洋／离岸风险评估和管理方向的师生提供了全面的参考，也能为行业专家、承包商、供应商、咨询人员及监管当局提供帮助。

ISBN 978-7-313-07927-5



定价: 520.00元

国家“十二五”重点图书船舶与海洋出版工程

海洋工程设计手册
—风险评估分册

（第2版）

原理——建模——应用

英文版原著　简·埃里克·维南(Jan Erik Vinnem)

中文版主审　陈　刚

上海交通大学出版社

内容提要

本书是第一本将量化风险评估(QRA)应用于海上设施和作业的专著。在离岸油气业,风险评估技术已经使用了30多年。随着离岸油气业拓展到新的地区以及在已有地区遇到新的挑战,风险评估技术的应用得到了迅速的发展。本书是进行了更新和扩充的第2版,包含了挪威离岸风险评估重大研发项目的成果,能反映出浮式海上生产设施得到大量应用的趋势。

本书首先对风险度量和风险分析方法进行深入探讨,随后的章节专门对安全和应急系统的事态加剧、逃生、撤离和救援分析方法进行论述。书中有单独的章节对离岸结构的主要危险:火灾、爆炸、碰撞和坠落物体进行分析。还讨论了风险的缓解和控制,以及如何对量化风险评估研究进行呈现。第2版更为重视风险评估技术在海上设施作业中的应用,并且还涵盖了海上设施退役方面的内容。

书中不仅介绍了离岸风险评估的最新进展,而且确定了需要进一步发展的薄弱之处。本书为海洋/离岸风险评估和管理方向的师生提供了全面的参考,也能为行业专家、承包商、供应商、咨询人员及监管当局提供帮助。

图书在版编目(CIP)数据

海洋工程设计手册—风险评估分册/(荷)维南(Vinnem, J. E.)著;陈刚主审. —上海:上海交通大学出版社,2012
ISBN 978-7-313-07927-5

Ⅰ.海... Ⅱ.①维... ②陈... Ⅲ.海洋工程—风险评价—技术手册 Ⅳ.P75-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 234294 号

海洋工程设计手册
—风险评估分册
[荷]维南(Vinnem, J. E.) **著**
陈 刚 **主审**
上海交通大学出版社出版发行
(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)
电话:64071208 出版人:韩建民
浙江新华数码印务有限公司 印刷 全国新华书店经销
开本:710mm×1000mm 1/16 印张:46.5 插页:10 字数:823 千字
2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-313-07927-5/P 定价:520.00 元

《海洋工程设计手册—风险评估分册》中文版编译出版委员会

主　任

陈　刚

执行副主任

陈　强　吴承业　陈书海　王　毅

副主任(以姓氏笔画为序)

Evgenious A. Koumoudhis(库穆迪斯)　孙　尧　刘义坤
杨立平　杨　志　杨建民　陈　君　金义重　周　海　赵卫民
胡　昊　顾长石　韩建民　潘华辰　戴文凯

委员(以姓氏笔画为序)

万德成　王东宝　王　靖　叶银灿　江雨蔺　严　谨　李淑民
张广浩　陈建民　陈景锋　邵永波　赵玉新　秦炳军

翻译人员

金　毅　丁　毅　庄浩然　钱　浩　徐　军　熊秋平　李树山

专业审校人员

梁启康　吴显沪　宋永明　金巍良　郑　瑜

翻译管理

管新潮

项目策划

管新潮　周长江

中文版序

21世纪是海洋世纪。

海洋是人类社会经济发展的重要支点，是人类科学进步与技术创新的重要舞台。海洋经济和海洋事业的发展离不开海洋科技的引领与支撑。海洋领域内的竞争归根到底是科技的竞争，而竞争的关键在于海洋高新技术。海洋高新技术已经成为世界新技术革命的重要内容，备受世界瞩目。如何利用海洋科技更为合理地开发、利用和保护海洋，已成为21世纪人类社会追求进步和实现跨越的主攻方向。

至今为止，我国的海洋科技已经取得了令人可喜的进步，无论是海洋船舶制造、海洋工程装备、海洋环境保护等方面的科技研发，还是在高端船舶、水下机器人、海上风电等海洋高新技术领域所取得的重大进展，都预示着海洋事业的可持续发展有了越来越强劲的科技支撑与保障。

与此同时，还有许多工作需要我们投入极大的努力与信心，因为海洋产业的优化升级、海洋事业的科学发展、海洋管理的全面提升等都对海洋科技提出了更高、更严的要求。海洋科技工作者既面临难得的历史机遇，也面临来自方方面面的挑战。我们需要不断提高对海洋的认知水平，努力构建起海洋科技的创新体系，为维护国家权益和安全做出我们应有的贡献。

海洋科技的进步与发展离不开科技人员富有创意的工作，而出版人为海洋科技知识的传播所做的努力亦属不可或缺。上海交通大学出版社在为国内的海洋科技工作者提供出版服务的同时，有选择地从国外引进一些海洋科技方面的图书，这是有意义的工作，值得肯定。

国外海洋科技图书的引进需要考虑经典性和先进性两方面因素。经典性的具体表现是图书的一版再版，这说明一种图书的生命力已经在专业读者群中得到了延续。上海交大出版社之前引进出版的《船舶工程技术手册》即是经典性的一种体现，因为该手册属工具类专业参考书，是专业人员的必备。而《基于风险的船舶设计》则是先进性的一种体现，因为该书所包含的知识均源自于第6

届欧盟委员会框架计划 SAFEDOR(安全设计、营运和监管)项目,它填补了国际上基于风险的船舶设计相关文献的空白。此外,先进性还应体现在我国对海洋高新技术发展的需要上,例如高技术高附加值船舶、船用关键配套产品、多功能自升式平台、深水浮式生产储卸装置、海上大功率风力发电机组关键技术、海洋工程材料耐腐蚀防护、海洋工程总装建造技术,等等。

引进图书的出版无论是选题策划还是翻译出版,都需要海洋科技工作者的参与,需要他们与出版从业者的密切合作。希望合作结出硕果,在引进国外图书的同时,更向社会奉献我们原创的海洋高新技术工具书和专著,以符合时代发展的需要。

是为序。

陈　刚

中文版前言

随着能源需求让勘探和生产作业步入更具挑战的极端地理和气候环境，商业和人身风险都在增加，实现回报也更加困难。国际海事和海洋环境的新公约、新标准和新规范陆续制定与颁布，如何采取积极的应对措施、如何使技术变得更安全、更智能、更绿色，已成为海洋工程领域发展的重中之重。开创安全、可持续发展的未来，是业界的任务与目标之所在。

海洋安全是一种现实需要，也是业界义不容辞的责任与义务。作为一家世界级的技术服务机构，GL（德国劳氏船级社）已然赢得了业界的信任，我们的愿景目标是将这种信任付诸实践、创新未来。高超的技术能力、对行业的远见卓识、对客户的专业呵护是我们实现这一目标的强有力的保障。

中国正在积极开展海洋防灾减灾、海洋资源利用、海洋环境治理、海洋船舶制造、海洋工程装备等方面的应用技术研究，探索建立海洋科技创新平台，为海事业的可持续发展提供重要的科技支撑。GL 愿在这一科技发展的潮流中，积极投身于海事业的建设，与时俱进、展望未来。

《海洋工程设计手册—风险评估分册》是第一本将量化风险评估技术应用于海洋工程设计和海上作业的专著。随着海洋油气业的新发展及其遇到的新挑战，风险评估技术的应用有了迅猛的发展。本书是诸多实践与科技创新成果的结晶，它的呈现带来了更多科技理念的创新，必将对中国海事业在这一领域的发展起到促进作用。我对上海交通大学出版社引进出版该书中文版表示衷心祝贺。

GL 之所以对该书中文版的出版表示出浓厚的兴趣并为此提供支持，缘由在于《海洋工程设计手册—风险评估分册》的撰写理念与 GL 一贯秉持的科技与管理理念不谋而合。不仅于此，GL 还会一如既往地致力于中国海洋工程领

域的可持续发展，以更多创新实践立足于业界。

愿我们携手并进，开拓美好未来。祝愿《海洋工程设计手册—风险评估分册》中文版的出版和发行取得圆满成功！

GL副总裁、大中华区域经理

库穆迪斯(Evgenious A. Koumoudhis)

2012年8月1日

英文版前言(第 2 版)

这是本书的第 2 版，第 1 版于 1999 年出版。随后作者在挪威斯塔万格大学担任全职教授，讲授离岸风险分析与管理的课程。这就有了对本书进行更新的需要。1999 年后发生的几次重大进展也意味着需要进行一次大的修订。

油价在 2006 年触及有史以来的最高水平(名义上)。但此时的经济气候却是尽力探究如何才能缩减成本并最大限度地提高利润。在很多情况下这就要求对风险进行仔细的考虑，不仅仅是进行“现成的风险分析”，而是详尽计划并大范围评估降低风险的选择和可能性。

大约在新世纪开始的时候，挪威离岸规范进行了重大的修订，从 2002 年起新规范成为了法律。本书的第 2 版吸取了新规范前 4 至 5 年应用的一些经验和挑战。本书对新规范的重要方面进行了简短论述，见第 1 章。

挪威第一份关于离岸业健康、环境和安全的白皮书在 2001 年发布，第二份白皮书发布于 2006 年。白皮书中确定的要求之一就是需要在离岸业进行更广泛的研发工作，并在 2002 年至 2006 年实施了一项重要的计划。本书第 2 版中的一些新结果就来自这个新的研发计划。

在第 4 章用了一些篇幅论述了大约 20 个主要是发生于北海的重大事故，以说明过去曾经历过的问题。在第 2 版中对这个主题给予了更多的关注，因为让后辈能从过去发生的事故中吸取教训也是非常重要的。只要有可能，除了论述事件的次序和得到的教训外，还将对屏障性能进行讨论。

涉及风险管理及基于风险分析结果决策的主题在另一本同样由施普林格出版社出版的书中进行了论述，书的作者是我的同事，斯塔万格大学的特里埃·艾文教授，该书于 2007 年出版。感兴趣的读者可以参考这本书《风险管理及离岸石油业的应用》。

还要表达对施普林格伦敦出版社的感谢，尤其要感谢范教授和高级编辑安东尼·道尔，他们同意出版本书的第2版，并在出版过程中提供了积极宝贵的建议。西蒙·里斯也为最终稿件的撰写给予我难得的帮助和支持。

附录A概述了一些经常使用的重要软件工具。感谢所有为本附录提供所需信息的咨询公司和软件供应商。

在本书第2版的写作中，我很幸运地得到许多同事和朋友的善意帮助，他们给予我宝贵的支持和协助。首先要向我的朋友，克兰登咨询公司的戴维·贝利致以诚挚的谢意和感激，他在第2版中又一次帮助我对语言进行了改善，并提供了技术上的意见和建议。没有戴维的热心帮助，第2版不可能像第1版一样出色。

我的同事，统计研究所的特里埃·艾文教授对论述风险和不确定性的统计处理提供了很大帮助。能实现这个重要改进我非常高兴。斯堪伯奥风险管理北京公司的陈海波博士也为移动设备的动力定位系统分析提供了很有价值的信息。

斯夫泰克·诺蒂克公司允许使用其几种工具进行说明和实例的输入分析，对此我要表达深深的谢意。还要特别要感谢托马斯·埃里克森、斯坦·豪根和阿恩斯坦·斯考格赛特。

还有几个人为各种技术细节提供了相关信息，他们是芬·威克斯特罗姆、阿克尔·克瓦纳和格雷厄姆·达尔泽尔，TBS3。女儿玛格丽特帮助我编辑了书稿。非常感谢你们所有人。

简·埃里克·维南

斯塔万格大学教授

2007年1月于布莱尼

英文版前言(第1版)

19世纪70年代末,海上设施的量化风险评估(QRA)还并不引人注目,作为研究工具首先在挪威开始使用,现在已经成为管理整个北海油气业安全、健康和环境的关键议题。虽然在早期阶段,其使用通常来自政府机构,但目前主要是由行业自身所推动。在离岸作业中为达到可接受的安全标准,量化风险评估被视为是获得扩展柔性的一个媒介。虽然一些领域的模型可能并不完善,有时知识也比较有限,但在寻求改进概念及优化设计和作业的过程中,研究成果还是得到了有效的利用。

本书源自20多年的离岸量化风险评估工作。在此期间,作者有机会从不同的角度实践并评估这些研究,包括了从咨询者、作业公司、研究者以及教育者的角度。

在位于挪威特隆赫姆的挪威科技大学海洋技术学院,作者曾经讲授过几年海事建筑风险分析的课程。写作本书首先需要对课程的讲稿进行更新。

希望将来本书也能为更广泛的读者提供有益的参考。近几年来,对离岸油气作业使用风险评估已经得到了迅速的推广。随着离岸石油业拓展到新的地区以及在已有地区遇到新的挑战,预期这种推广还将持续一段时间。

在1999年第1季度,油价触及多年来的最低水平。人们可能倾向于认为经济气候将阻碍对风险评估和安全改进的进一步关注,但情况可能恰恰相反。正如一位挪威国家石油公司(Statoil)的朋友不久前说道:“每当利润变得紧张,对风险评估的需求就会增加,寻求的每一个更新、更优的解决方案,都需要进行风险的评估”。

在挪威,1999年初挪威石油管理局(NPD)也正准备对海上设施和作业规范进行一次大的修订,预期在2001年生效。虽然很显然无法获取新规范的最终要求,但可以在已知的范围内,尝试了解规范中新的趋势。

过去的10到15年里出版过几本关于风险评估的书,大部分都专注于相对一般的主题。有些也将重点放在风险管理方面,但比较普通,可以应用于离岸

业。已知的书中都没有对量化风险评估研究的使用需求和主题进行介绍，特别是针对离岸业。本书力图能够填补这一空白。

在北欧，量化风险评估研究的使用显得有些特别，尤其在挪威。离岸应用支配了这些技术的使用，重点主要放在人员风险的量化上。而且人员风险几乎从不涉及使公众面临危险。这样从方法学的角度来看，研究很少遇到挑战。许多人可能认为这是优势，但也是有劣势的。这种挑战也可以导致方法的改善。可能不算是巧合，北海离岸应用的风险分析师对改善和发展建模的兴趣有时是非常低的。

本书力图阐述当前离岸设备和作业量化风险评估研究中涉及的建模工作。书中还说明了需要进一步发展的一些不足之处和领域。希望通过这些介绍，能够引发更多的完善和提高。

1. 关于本书的内容

离岸设备的量化风险评估有以下主要步骤：

1）确定危险
2）起因及概率分析
3）事故场景分析
4）后果、破坏及损伤分析
5）逃生、撤离及救助分析
6）死亡事故风险评估
7）降低风险手段的分析

本书结构据此进行划分。每一步骤都至少有一章（有时是更多章）专门进行介绍，主要次序与上述内容相同。书中另外还包含了几章关于风险分析方法、事态加剧的分析方法、安全和紧急系统的逃生、撤离和救助分析以及风险控制的内容。

从以往经验中汲取教训是很重要的，尤其是从先前的事故中。第 4 章结束部分对主要是北海的十几个重大事故进行了讨论，以说明过去曾经历过的问题。

离岸建筑的主要危险是火灾、爆炸、碰撞和坠落物体。这些危险及其分析将在不同的章节中进行讨论。风险的缓解及控制在两个章节中予以介绍，然后

是风险建模替代设计的概述,并特别将重点放在与短期行为相关的风险上。最后讨论了在航运上的应用,主要涉及生产储油船,同时也考虑了航运的一般应用。

2. 致谢

写作本书用到的部分材料最初是为石油经营与管理计划(PETRAD)的一门课程所准备的,该课程在挪威斯塔万格进行讲授。非常感谢允许将这些材料用于本书。

统计概述部分的主要内容源自挪威国家石油公司、挪威海德鲁公司、萨迦石油公司、挪威埃尔夫石油公司以及挪威石油管理局资助的一些研究。作者要感谢这些公司允许将研究内容公开。

非常感谢挪威科技大学海洋技术学院给予的直接资助。作为挪威科技大学海洋技术学院的兼职教授,使我能有机会在几年时间里专心准备讲稿和实例。在普利凡特公司的咨询工作也为本书的大部分内容提供了帮助,包括对外服务工作。

还要感谢位于荷兰多德雷赫特的克吕维尔学术出版社同意出版这本书,并在出版过程中给予了积极宝贵的建议。

附录A概述了一些经常使用的重要软件工具。感谢所有为本附录提供所需信息的咨询公司和软件供应商。附录B直接复制了挪威石油标准化组织(NORSOK)对风险和应急准备分析的指导准则,感谢挪威石油标准化组织秘书处允许本书进行复制。

一些咨询公司同意本书使用其材料,非常感谢他们的善意帮助。感谢挪威船级社(DNV)允许免费使用世界离岸事故数据库(WOAD)作为本书统计数据的来源。感谢挪威科技工业研究院的火灾研究实验室同意使用他们的海上火灾研究实例,以及斯堪伯奥公司同意使用其风险评估方法实例。感谢斯夫泰克·诺蒂克公司允许使用其软件 Collide 的分析结果和实例。

我还要特别感谢几个人,在将这些材料整理为最终书稿的过程中,他们提供了非常宝贵的帮助。我的同事克兰登咨询公司的戴维·贝利博士,评阅了初稿并对技术和语言提出了许多宝贵的意见。清晰简明的文字非常关键,为此所做的努力也就极为重要。他的独特贡献在于对语言进行了大量改善,并结合了对技术主题的敏锐意见及补充想法。非常感谢你,戴维,你的不懈努力使初稿得到了很大的改进。

我的大儿子约翰·厄林帮我准备书中用到的几个案例研究以及许多实例。我的兼职秘书安柏瑞·克罗格达尔女士花费大量精力来辨认我的潦草笔迹，谢谢你的热情和耐心。校对得到了克丽斯蒂·彼得森女士的帮助，同样也要谢谢克丽斯蒂的热情及宝贵的帮助。最后，陈海波硕士也帮助进行了校对及文字连贯性的检查，非常感谢你的帮助。

简·埃里克·维南

1999 年 5 月于布莱尼

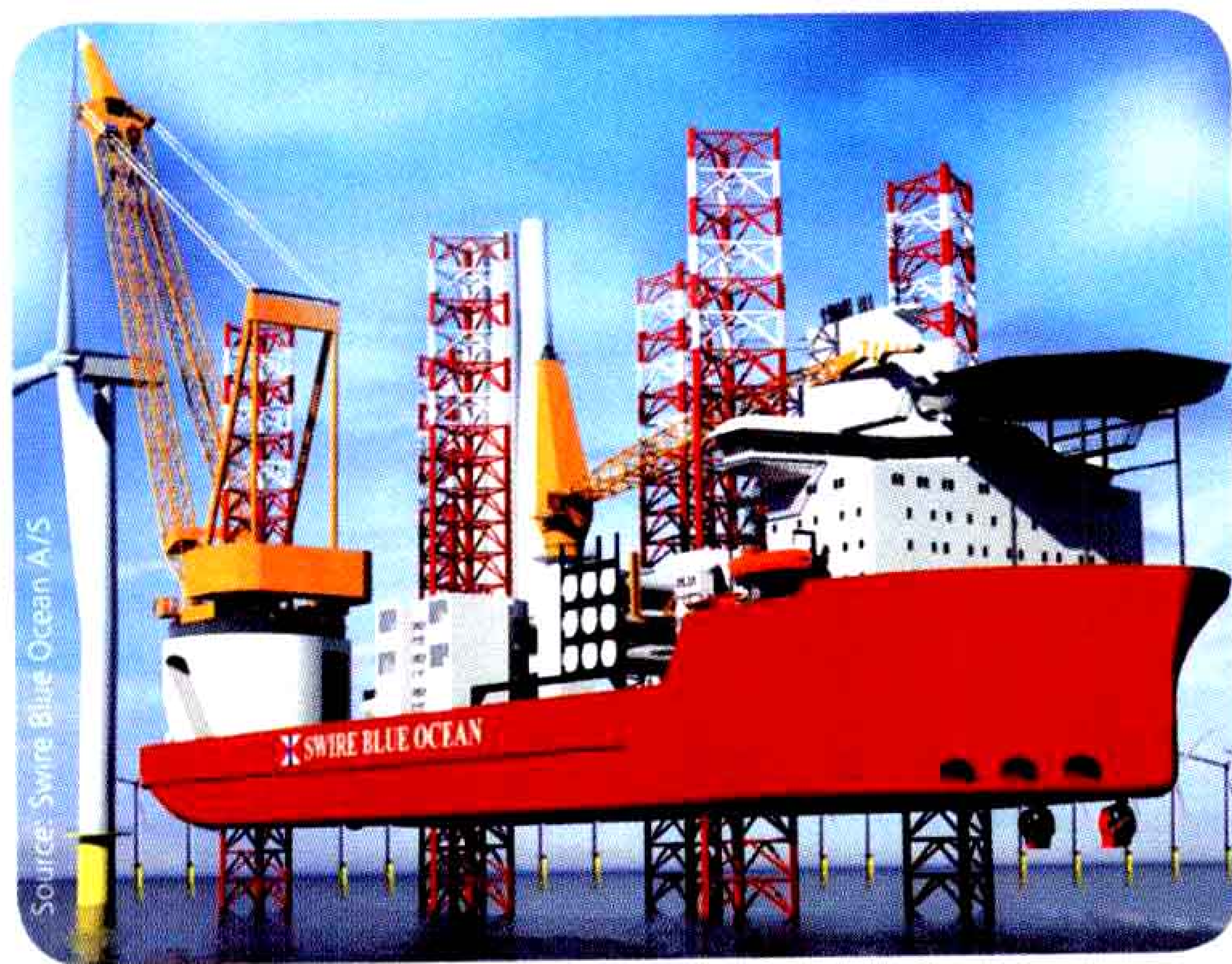
德国劳氏船级社（GL）



能源革命之船

目前，市场对风电场安装船和各类海洋工程安装服务有强劲需求。早在2009年，德国劳氏船级社就已经出版了海洋工程船舶入级规范，这类船舶用于海洋工程支持和供应、海上拖航、油井增产和其他专业海上服务。

海洋工程船舶的设计和营运与普通货船大不相同。因此需要全面的国际规范专门解决海洋工程船舶的实际需求。新规反映出今日的海洋工程船舶与前几代相比，现在的船舶更大、更专业、技术更先进，能满足复杂深水区域的开发需求。最新的海洋工程船舶规范旨在支持设计和建造更安全、更可靠的海洋工程船舶，同时将营运风险降到最低。



为风机安装船“Pacific Orca”提供全面的一站式服务

该规范适用于提供海洋工程支持和供应、海上拖航、增产措施和其他专业海上服务的船舶。指定船级符号为OFFSHORE SERVICE VESSEL，有其他附加符号作为补偿，如HNLS（运输危险品及有毒有害液体物质）、AH（操锚）、wsv（油井增产）、WTIS（风机安装船/建造支持船）。

在海上风电市场，GL已经为欧洲市场的15艘专门风场安装船提供入级服务。

德国劳氏简介

德国劳氏致力于保证海上生命和财产的安全，并防止海洋环境污染。作为独立的第三方，德国劳氏为船东、船厂和船舶配套行业提供先进的规范和指南。GL定期对8000多艘营运船进行检验，超过1.03亿总吨。

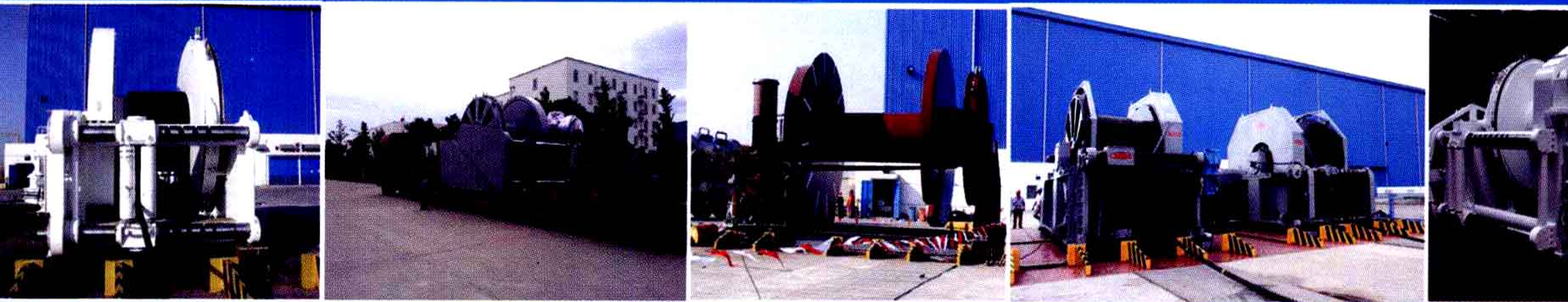
除海事领域之外，GL集团还经营石油天然气和可再生能源领域的业务。旗下的GL Noble Denton专门为石油天然气行业提供专业技术建议和操作支持，主要为安全和风险咨询、海事保证、认证、验证和软件应用。

GL集团的可再生能源咨询服务由GL Garrad Hassan提供。它为陆上和海上风能、波浪能、潮汐能和太阳能提供独立的技术和工程服务、产品和培训课程。

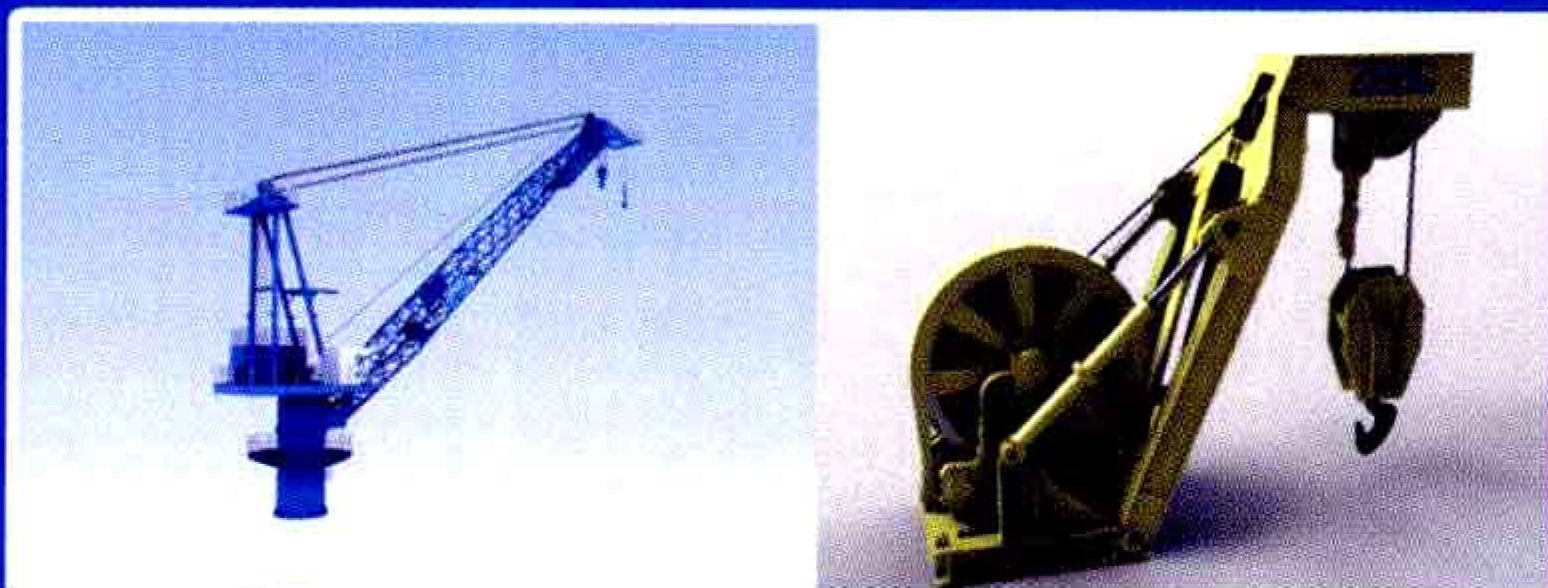
德国劳氏船级社（中国）有限公司 中国上海淮海中路381号中环广场1201室
邮编：200020 · www.gl-group.com





















江苏省船舶金属材料质量监督检验中心

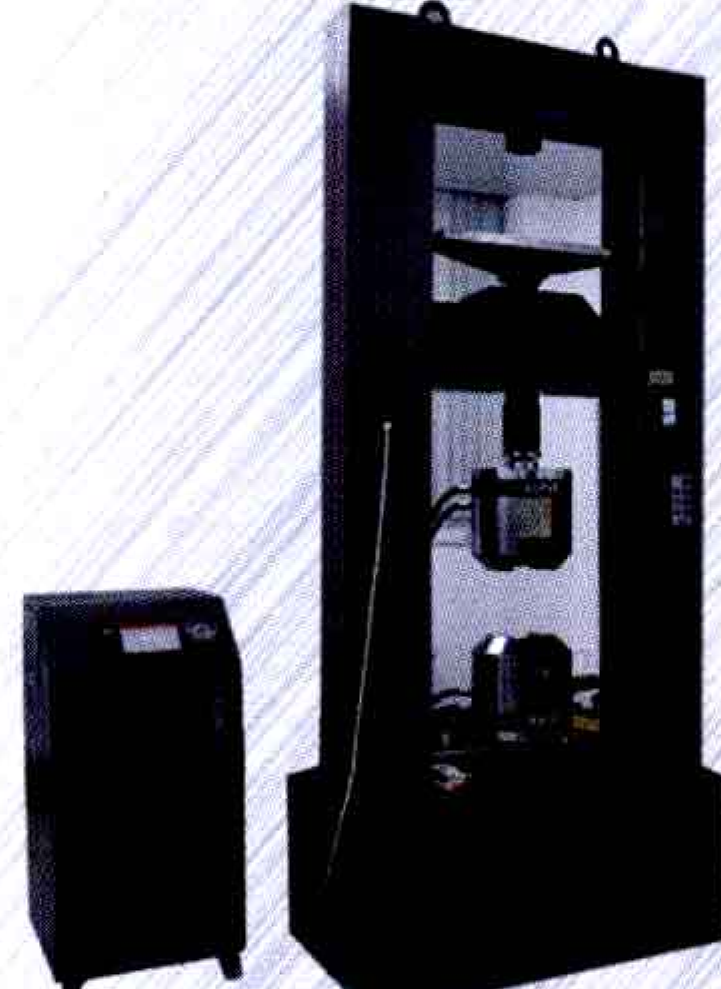
江苏省船舶金属材料质量监督检验中心（以下简称省船舶中心）2011年经江苏省质量技术监督局批准在江阴市产品质量监督检验所基础上成立。省船舶中心的前身江阴市产品质量监督检验所冶金中心多年来以踏实进取的精神稳健发展，检测能力、装备水平始终在苏锡常地区同类机构中处于前列。中心先后通过了实验室资质认定(CMA、CAL)、国家实验室认可(CNAS)，CCS中国船级社验证实验机构认可，是德国莱茵技术TUV(上海)有限公司承压设备和材料的合作实验室，并与各类船级社(LR、BV、ABS、DNV、GL、CCS、KR)合作承担部分工厂产品认可检测业务，涉及机械设备、管道容器、压力容器、船用设备、风电建设及交通工程(包括桥梁、路政)和建筑工程等多个领域。

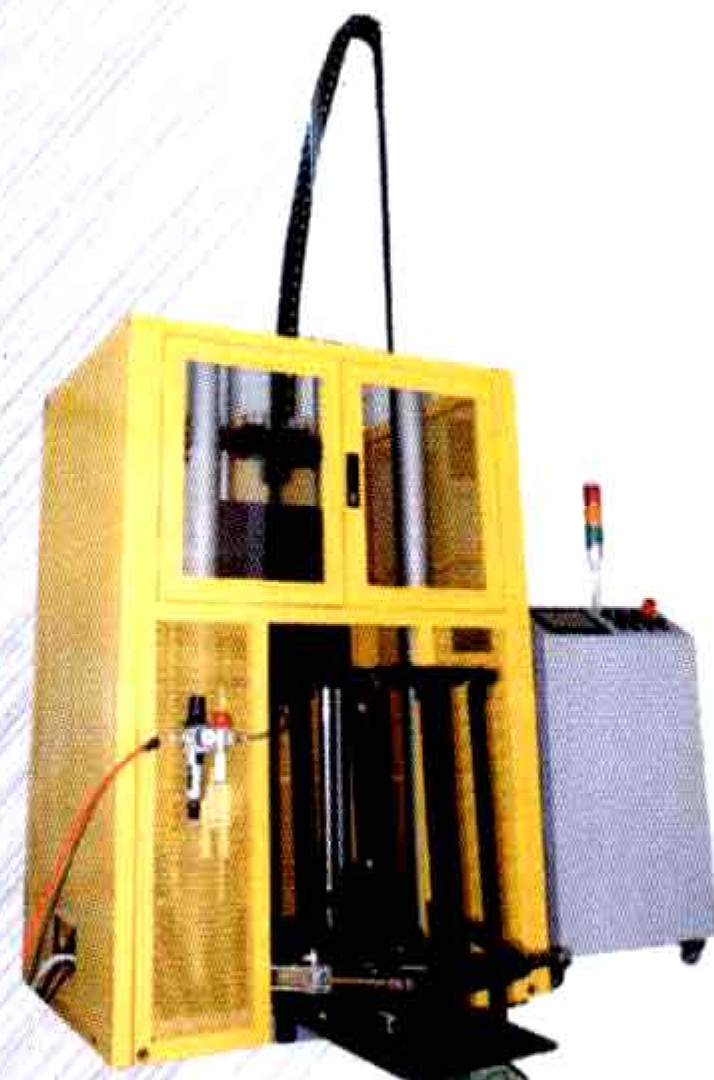
质检所现有专业技术人员：高级工程师4人，工程师12人，质量工程师7人；高等学历人才：硕士生8名，在读硕士生7名，本科以上学历33名。省船舶中心检测人员大部分拥有5年以上工作经验，定期参加相关的业务培训，多次参与国家认监委、国家实验室认可委员会、省局组织的能力验证工作，并取得较好的成绩，与同类实验室之间开展的检验数据比对工作也取得了满意的结果。同时，中心还有国家注册设备监理师2人，江苏省特种设备无损检测资质三级1人，二级4人，机械工程学会无损检测资质二级3人。

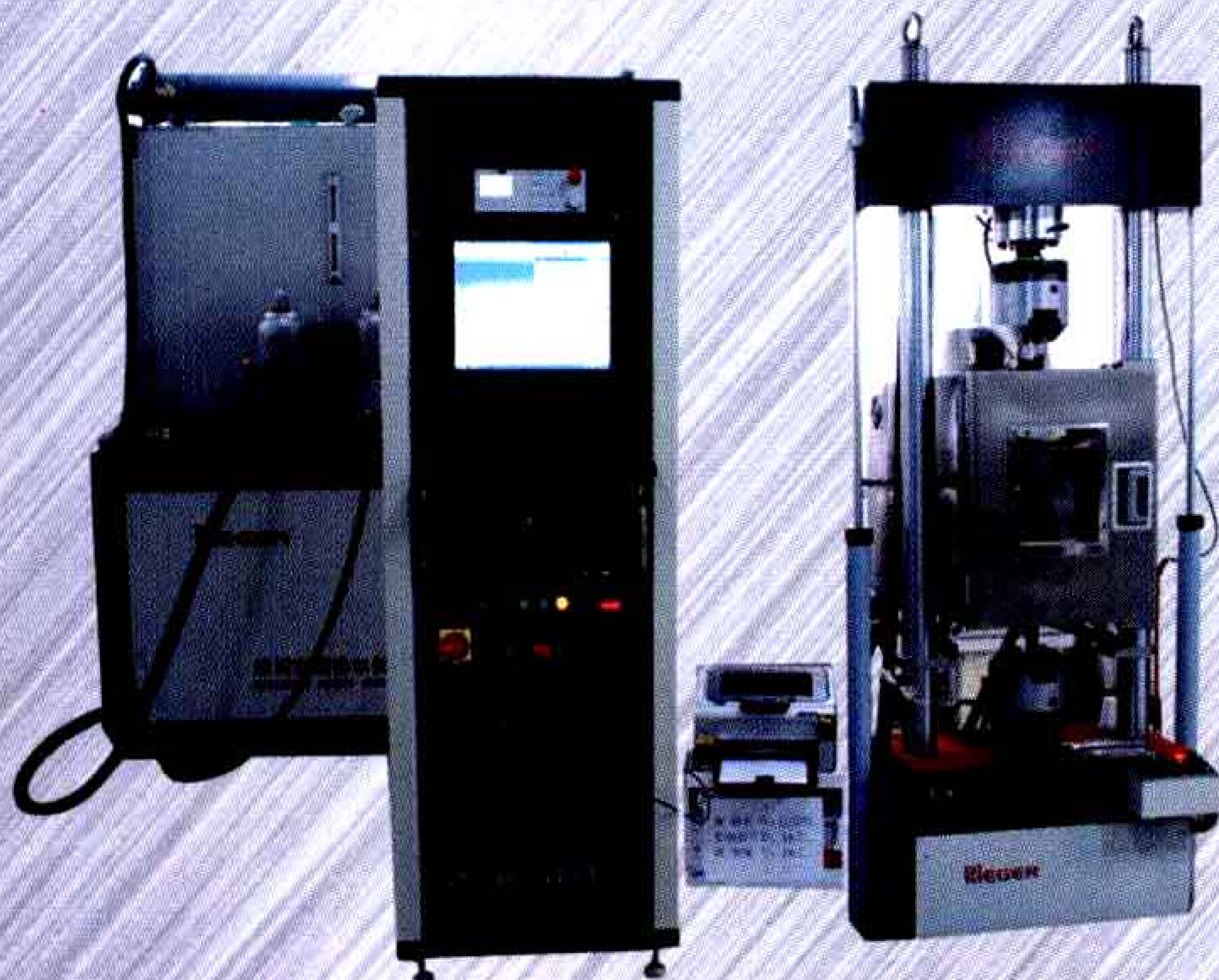
中心主要检测范围包括物理性能、化学分析、金相检验、金属腐蚀、无损检测及耐候性检测六类，并为理化检验人员提供技术培训。


美国力克TC600型氮氧分析仪


美国ATLAS Ci3000+氙灯耐老化设备


MTS CMT5305电子拉力机


美国MTS ZCJ2303型落锤冲击试验


美国MTS BHT5206型微机控制电液伺服弯曲试验机


德国Observer A1m蔡司金相分析仪


德国ARL光谱分析仪

江阴市产品质量监督检验所
地址：江阴市澄江西路155号
邮编：214431
电话：0510-86838076
邮箱：jyszjs1111@163.com


MTS ZBC2302-3微机金属摆锤冲击试验机


美国SINGLETON SCCH21盐雾试验

目　录

第 5 章 量化风险评估法 Methodology for Quantified Risk Assessment …… 142

第1章　引　言

Introduction

1.1 量化风险评估介绍 About “QRA”

“QRA”是“量化风险评估”或“定量风险分析”的缩写，通常要考虑背景情况以确定使用哪个词比较合适。风险评估涉及(见缩略语，第665页)风险分析以及结果的评估。“QRA”是经常应用于离岸作业风险评估的词语之一，这种技术也可称为：

- 定量风险评估(QRA)；
- 概率风险评估(PRA)；
- 概率安全评估(PSA)；
- 概念安全性评价(CSE)；
- 总风险分析(TRA)，等等。

尽管已经使用和发展了20多年，但是并没有形成能被大家普遍接受的表述词语。QRA和TRA是最常用的缩写。起源于美国的核工业，特别倾向于使用概率风险评估或概率安全评估。

1981年挪威开始使用概念安全性评价(CSE)，其兴起看来是新概念风险评估的一个成果。同样源自挪威的总风险分析(TRA)，主要是指详尽的死亡事故风险分析。

事实上所有这些词语是否具有相同的含义可能还有争论。本书主要将“QRA”视为“量化风险评估”或“定量风险分析”的缩写。“QRA”也可以作为“定量风险评估”的缩写，它们的区别在于后者除了风险分析外，还包含了风险评价。

将量化风险评估研究应用于离岸业要追溯到20世纪70年代后期。当时实施了几个以研发为主的先驱性项目，旨在研究是否存在可用的分析方法及足够完备可靠的数据。

采纳的主要方法和数据当时在核电业已经使用了若干年，特别是参考了3～4年前提出的核电站风险报告WASH 1400(NRC，1975)。

量化风险评估的下一步发展出现在1981年，挪威石油管理局(NPD)为平台概念设计的安全评价发布了指导准则(NPD，1980)。这些规范要求在概念设计阶段对所有新的海上设施进行量化风险评估。规范包含了为定义设计基准事故，需要考虑的事故发生率限制标准是每平台每年10^{-4}次，设计基准事故即通常所说的设计意外事件。

当选择了设计基准事故并实施了保护性措施后，必须对剩余风险进行评估。剩余风险等级要同上述的限制标准进行比较。图1.1是浮式生产概念的典型结果集，并给出了不同安全功能的损害事件年发生率。

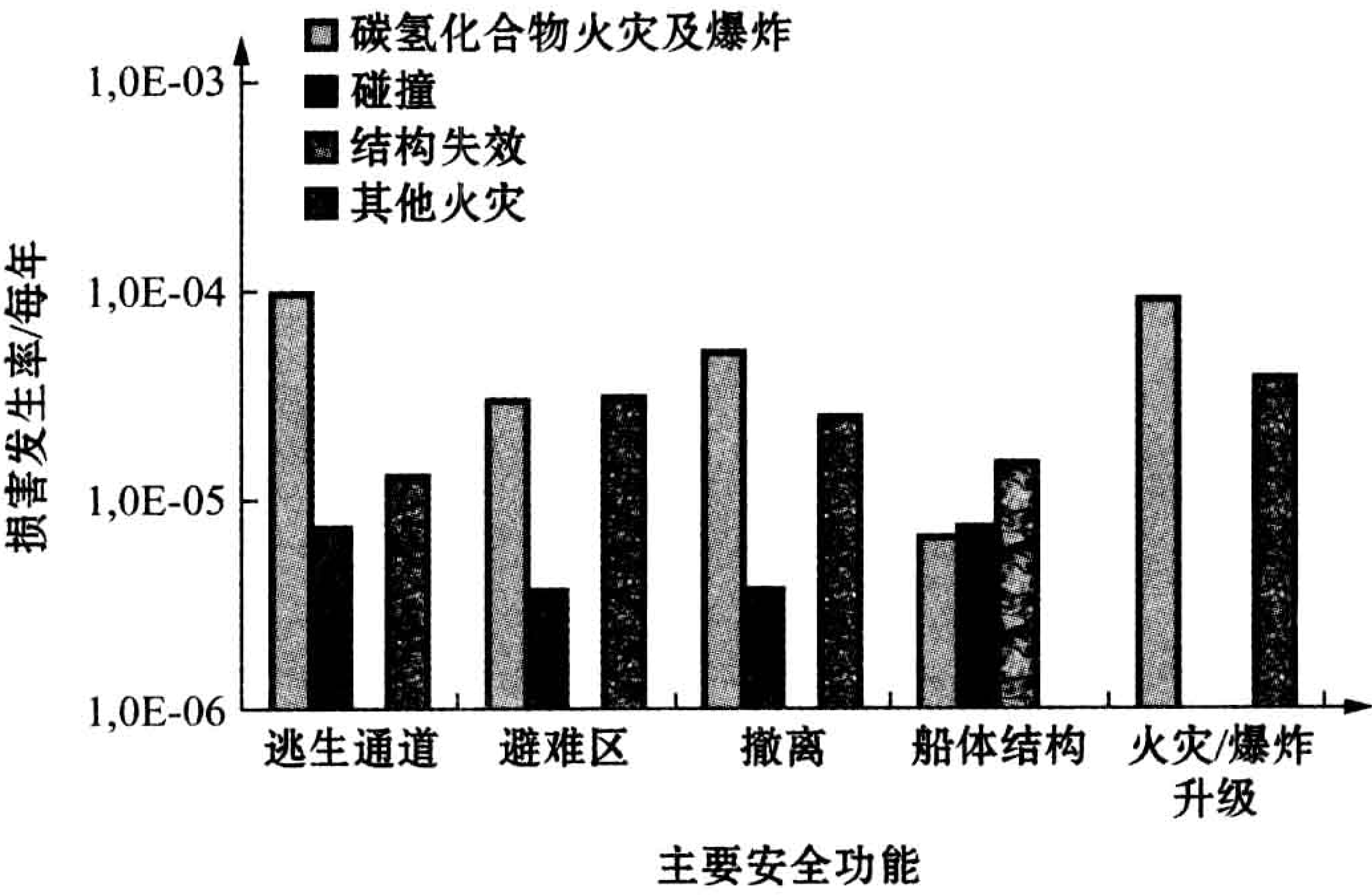


图1.1　剩余意外事件的年发生率

多年来，挪威是唯一系统应用量化风险评估的国家。英国离岸业和管理当局一直声称这种研究不是提高安全性的正确途径。

但下一步重大进展却来自英国，1988年派珀·阿尔法平台发生严重事故后由洛德·卡伦领导进行了官方调查。洛德·卡伦在其报告(Lord Cullen，1990)中建议应该像10年前的挪威那样将量化风险评估引入英国法规。

在1991年，挪威石油管理局用风险分析规范替换了1981年的风险评估指导准则(NPD，1990)，极大地拓展了这些研究的范围。

1992年安全案例规范在英国生效(HSE，1992)，作为安全案例的一部分，此后英国离岸业被要求对现有及新海上设施都进行风险评估。在新规范下，量化风险评估研究的应用得到了迅速扩展。值得注意的是在一些场合，对于运用在派珀·阿尔法平台灾难之前就存在的量化风险评估研究仍然存在较大的

怀疑。

在简短的历史回顾中,下一步的发展是作为顶边系统爆炸冲击与消防工程(BFETS)计划的一部分而于 1996～1998 年期间开展的爆炸冲击和火灾研究(SCI, 1998)。其重点是平台可能的气体爆炸场景所导致的高爆破载荷。作为这项工作的一个成果,评估如何将爆炸场景概率性地引入量化风险评估模型引起了相当大的关注。

挪威石油管理局(NPD)于 2001 年发布了一系列新规范,并从 2002 年 1 月 1 日起取代风险分析及技术规范。健康、环境与安全(HES)管理规范规定了需要进行的风险分析及其他分析。这些规范要求进行风险分析以及定义风险接受的准则。挪威石油管理局(NPD)自 2004 年 1 月 1 日起划分为两个组织,其安全部门成为一个新的组织,称为挪威石油安全管理局(PSA)。挪威石油安全管理局(PSA)同时也承担了石油开采、码头和炼油行业 6 个岸上设施及健康、环境与安全管理规范的管理责任。

安全案例规范于 2005 年进行了修订,于 2006 年 4 月 5 日起生效。

因为需要更多地全面整合离岸及岸上设施规范,挪威规范的结构在 2007 年进行了改变,但海上设施基本没有很大的变化。

1.2 与其他分析方法相关的量化风险评估 QRA in Relation to Other Analysis Methods

挪威管理部门对风险评估的所有系统化方法都使用了“风险分析”这个词(NPD, 1990),包括定性分析和定量分析。涵盖了:

- 危险与可操作性研究(HAZOP);
- 安全性与可操作性研究(SAFOP);
- 安全工作分析(SJA);
- 预先危险分析(PHA);
- 失效模式与影响分析(FMEA);
- 定量风险分析(QRA)。

上述前 5 项实质上都是定性方法，虽然这些技术有些能够以半定量的方式来使用。最后一项是定量方法。挪威法规中没有使用特定词语来区分量化风险评估及定性技术，这是一个缺点。讨论需求时经常很不明确，因为没有对不同类型的风险分析进行区别。本书只对定量方法——量化风险评估进行讨论。

1.3　目标与局限性 Objectives and Limitations

本书主要关注量化风险评估在离岸油气业的应用，目的如下：

1）为海上设施及海事建筑的量化风险评估研究的绩效提供指导。

2）说明如何有效使用工具、方法和数据以确保量化风险评估为基于风险的决策提供有用的信息。

3）说明最佳实践是如何实现的。

4）提供近 5 年研究活动的新知识。

5）对目前尚未完全解决的问题提出一些观点。

建模的讨论也是以应用为导向的，因而危险建模将涉及海上设施的最主要危险：

- 火灾；
- 爆炸；
- 碰撞；
- 海洋灾害。

其他危险也进行了说明，如坠落物体，但比较简短。

本书对人员风险描述得比较深入，但也涉及环境风险及物资损失风险。对于环境风险评估的方法没有进行讨论，目前仍然有几种方法尝试应用于这个领域，但对可推荐的方法尚未达成一致。

量化风险评估的大部分工作是在设计阶段进行风险评估。但在作业阶段使用风险评估也是很重要的，所以本书相当部分的篇幅涉及了这个阶段。近来的研究也将重点放到作业阶段上，书中将会做一些深入的讨论。

介绍的所有图示和案例大多与离岸油气勘探、生产和运输的海上设施及海事建筑相关。书中对涉及运送人员和供应物资到海上设施也进行了说明。

1.4 相关规范和标准 Relevant Regulations and Standards

已经有几个国家的法规要求在海上设施的设计和作业中应用量化风险评估：

- 英国；
- 加拿大；
- 澳大利亚；
- 挪威。

以下是这些国家法规要求的简短摘要，不包括英国和挪威，这两个国家的法规将在本章其余部分进行一些深入的讨论：

- 加拿大（纽芬兰及拉布拉多近海区）
  - 对于新的开发申请，需要进行概念安全分析。油田开发申请需要阐述如何才能实现概念安全分析，并对设定为风险接受准则的“安全的目标层次”进行说明。
  - 开发申请还应说明“风险评估计划”，包括各种特定风险的列表以及进行详细设计时可能需要的安全分析。还应提供完成这些研究和分析的计划，以及如何将这个过程集成到设计过程的说明。最后，需要提供使用方法的说明及在整个过程中方法有效性和相关性的论述。
- 澳大利亚

○ 石油(下沉陆地)(海上设施安全性管理)规范,1996年(NOPSA,1996)。
○ 这些规范要求为所有设备撰写安全案例,并说明风险已经降低到符合最低合理可行原则(ALARP)的水平。
○ 澳大利亚国家海上石油安全局(NOPSA)也发布了安全案例指导原则(NOPSA,2004)。

还有其他几个国家主要是自愿应用量化风险评估,如因为公司政策的要求,像壳牌集团。下文的重点是英国和挪威的法规,将对涉及风险评估和风险管理的相关要求进行简要介绍。

1.5 挪威规范 Norwegian Regulations

挪威石油安全管理局(PSA)自2002年以来发布过5个管理设计安全及海上设施作业的规范(不考虑2007年的小修订):

- 石油作业中涉及健康、环境与安全的规范(框架规范,PSA,2002a);
- 石油作业中涉及管理的规范(管理规范,PSA,2002b);
- 石油作业中涉及设施设计和装备的规范(设施规范,PSA,2002c);
- 石油作业中涉及作业实施的规范(作业规范,PSA,2002d);
- 石油作业中涉及物资和信息的规范(信息责任规范,PSA,2002e)。

1.5.1 框架规范 Framework Regulations

这是高层次的规范,包含了在其他规范中进行详细说明的总体原则。其中有一个要求是其他规范中所没有的,即对应于最低合理可行原则(ALARP,见第1.6.1节)评估的挪威规范要求,见规范第9节的内容。

第 9 节第 1 和 2 段特别对降低风险的要求进行了说明，非常符合英国规范中对最低合理可行原则的阐述。

> 第 9 节
> 涉及降低风险的原则
>
> 应遵从有关健康、环境与安全的法规，包括内部要求和接受准则，预防或限制对人员、环境或金融资产的损害或损害危险。超过这个等级应能将风险进一步降低到可能的程度。在石油作业的所有阶段都应进行基于本规定的评估。
>
> 为降低风险，责任方应根据潜在损害的单独和总体评估，以及现在和将来能提供最佳效果的应用情况，来选择技术、作业或组织解决方案，只要相关成本同降低的风险相比不是非常不成比例。
>
> 关于使用的技术、作业或组织解决方案对健康、环境与安全可能产生的影响，如果没有足够的知识，就应选择能减少这种不确定性的解决方案。
>
> 在石油作业中，可能对人员、环境或金融资产造成损害或损失的因素，应以全面评估中潜在损害或损失较小的因素取而代之。

框架规范制定后的前几年，第 9 节的内容并没有得到很大关注。从 2006 年开始情况逐渐有了改变。挪威石油安全管理局(PSA)于 2005 年下半年提出了对框架规范的这部分内容予以更多关注的倡议。

框架规范另外一个得到关注的问题是应急预案。对于系统应急计划和准备的总体要求，框架规范要比其他规范说明得更为详细。

1.5.2 健康、环境与安全管理规范 HES Management Regulations

健康、环境与安全管理规范中有几节非常重要，涉及风险分析、屏障分析以及风险接受准则。

管理规范中关于重大事故风险分析及定量风险分析的两节特别重要，这两节全文如下：

第 14 节

重大事故风险分析

应进行定量风险分析和其他必要的分析以确定重大事故的原因，包括说明：

a）同计划的钻探和油井作业相关的风险，并说明这些作业对设施总风险产生哪些影响；
b）修改及实施修改对总风险的影响；
c）涉及在大陆架和海岸之间以及设施之间运送人员的风险。

分析还应该用于设定操作条件及根据风险对区域、系统和设备进行分类。

第 15 节

定量风险分析和应急预案分析

应进行定量风险分析，以提供平衡及尽可能全面的风险状况。风险分析应：

a）确定危险和事故的解决方案，选择触发事故并说明事故的原因；
b）对事故次序和后果建模，这样就可以从其他事物中发现物理屏障之间可能的从属关系，并能对必须设定的屏障性能要求进行计算；
c）对重要的安全系统进行划分；
d）说明提供了足够的主要安全功能；
e）确定计算意外载荷；
f）为选择和说明危险及事故状况提供基础。

应进行必要的灵敏度计算及不确定性评估。

应进行应急预案分析，包括：

a）说明危险和事故的状况；
b）设定应急预案的性能要求；
c）选择并定义应急预案措施。

第 2 节涉及可能需要的屏障或防护，关注海上设施的设计和操作。

> 第 2 节
> 屏障
>
> 设施的经营者或负责经营的人应保证屏障设计、使用和维护所基于的策略和原则，以确保设施在使用期限内的屏障功能。
>
> 参考关于降低风险的第 1 节第 2 段，应了解建立了什么屏障及要达到的功能，定义了什么涉及技术、作业或组织因素的性能要求，这些因素是使单独屏障生效所必须的。
>
> 应了解哪些屏障已失效或受到损害。
>
> 对于缺失或受到损害的屏障，责任方应采取必要的行动来修正或弥补。

第 6 节详细说明了风险接受准则，包括人员、主要安全功能（见第 1.5.3 节）以及对第三方人员和设备的污染和损害。最后部分不适用于海上设施，但适用于也属于挪威石油安全管理局（PSA）管辖范围的岸上设施。

> 第 6 节
> 重大事故风险和环境风险的接受准则
>
> 经营者应为重大事故风险和环境风险设定接受准则。
>
> 应为以下情况设定接受准则：
>
> a）设施上的所有人员，以及风险比较大的人员；
> b）涉及主要安全功能的设施规范，第 6 节说明了主要安全功能的缺失情况；
> c）设施产生的污染；
> d）对第三方的损害。
>
> 应使用接受准则对定量风险分析的结果进行评估，并参考涉及重大事故风险的第 14 节、定量风险分析及应急预案分析的第 15 节、环境导向风险及应急预案分析的第 16 节、以及涉及降低风险原则的框架规范第 9 节。

1.5.3 设施规范 Facilities Regulations

关于风险评估，设施规范的主要作用是为损害主要安全功能的事件最大发生率定义了原则。以下是第 6 节及第 10 节的内容：

第 6 节

主要安全功能

对于每个单独设施都应明确定义主要安全功能，以确保人员安全并限制污染。

对于永久性有人设施，如果发生事故，应维持以下主要安全功能：

a）防止事故升级，这样紧邻事故现场的人员就不会受伤；
b）维持承载结构的主要承载能力，直至设施人员撤离；
c）保护重要场所抵御意外事件，在设施人员撤离前保持运行，参考涉及消防区域的第 29 节；
d）保护设施的安全区域，在设施人员撤离前保持完好；
e）所有可能有人的区域都至少要保持一条撤离通道，直至人员撤离到设施的安全区域并得到救援。

第 10 节

载荷、载荷影响及抗力

应确定影响设施或部分设施的载荷。年概率大于等于 1×10^{-4} 的意外载荷和环境载荷应该不会导致主要安全功能的损失，参考关于主要安全功能的第 6 节。

确定了载荷后，应考虑储油层上方或与储油层相关的海底沉降影响。

功能及环境载荷应以最不利的方式进行组合。

设施或部分设施应能在任何时候承受设计载荷及这些载荷可能的组合。

同设施相比，主要安全功能与设计特性的关系更为紧密。但几个涉及如何说明这些要求的方面并没有达到应有的明确性，特别是涉及如何定义区域及如何合并不同类型的事件和区域。

1.5.4 活动规范 Activities Regulations

活动规范中没有涉及风险评估和管理的相关要求。从更大的健康、环境与安全角度看，最相关的方面是应急预案、工作环境、外部环境、钻探和油井控制以及屏障。

1.5.5 挪威海事管理局风险分析规范 NMD Risk Analysis Regulations

挪威海事管理局曾发布“移动式平台风险分析规范”，适用于所有应在挪威船舶登记簿注册的移动式平台。

规范应用于平台所有者，包含了针对实行及更新风险分析的内容。涉及风险分析概念、构建风险分析、完成风险分析，此外还有可靠性、脆弱性分析和应急预案分析。规范还涵盖主要安全功能的通用风险接受准则及设计准则。

1.6 英国规范 UK Regulations

由于1988年的派珀·阿尔法平台事故（见第4.7节），根据Lord Cullen（1990）的调查建议，英国彻底重新制定了离岸监管制度，并发布了下列规范：

- 安全案例规范（SCR）（HSE，1992）；
- PFEER（火灾爆炸预防与应急响应）规范（HSE，1995a）；

- 管理与行政规范(HSE,1995b);
- 设计与建造规范(HSE,1996)。

1.6.1 安全案例规范 Safety Case Regulations

责任方被要求确定危险、评估风险并说明为控制风险已经或将要采取的措施,如使剩余风险等级符合最低合理可行原则(ALARP)。安全案例还应说明经营者应该有健康、环境与安全管理系统,系统应能确保符合所有健康与安全监管要求。

规范本身并没有涉及量化风险评估。在一些列出了提交文件的计划表中提到了量化风险评估。但在“安全案例的内容——总则”中可见关于使用量化风险评估的进一步讨论。此法规中量化风险评估主要是用来分析:

- 对临时避难所造成损害的风险。
- 对人员的直接风险,根据潜在人命丧失、平均个体风险或者一些其他死亡事故措施的说明。

量化风险评估方法的主要基础实际上是不明确的,因为责任方被要求通过安全案例说明海上设施的人员风险等级要符合“最低合理可行原则”,简称为ALARP。而这只有通过使用量化风险评估才能有效做到。

安全案例规范中的量化风险评估方法同挪威规范几乎是一样的,只是安全案例规范仅应用于涉及人员风险,而挪威规范应用于一系列风险,包括人员、环境和资产,如第2章所述。

安全案例规范于2006年4月进行了修订,规范删除了符合最低合理可行原则的明确要求。但这不会影响实际使用,因为工作健康与安全管理法案(HSE,1974)包含了符合最低合理可行原则的相应要求。以下是一些其他主要改变:

1) 再次提交。以前一个安全案例要持续3年,这样就需要为了评估而再次提交。在新安全案例规范中,安全案例的持续时间为海上设施的使用期限,不

需要再次提交。但是仍有进行适当修订的义务，并引入了通过每隔 5 年检查或指导来进行修订的新要求。卫生与安全管理局已经拥有“指导修订”及“暂停”安全案例的权利。安全案例涉及材料变化的修订仍然需要提交并得到认可。

2）联合作业安全案例。以前实施任何联合作业前都必须提交联合作业安全案例，这已经被更简单的通知所取代。如果有联合作业的话，作业安全案例将包含总体的管理说明；如果没有包含总体说明但计划进行联合作业，必须事先提交材料有所变化的修订版并得到认可。

3）设计安全案例。以前在新的固定设计完成前需要提交设计安全案例，这已经被更简单、方便的设计通知所取代，并且同样可以应用于一些设计改变。

4）放弃安全案例。以前在设施退役前必须提交放弃安全案例，说明停止生产的作业，如封堵油井。这已经被提交专门的安全案例拆卸修订所取代，其他更早的作业通过修订作业安全案例进行处理。

1.6.2 火灾爆炸预防与应急响应规范 PFEER Regulations

称为 PFEER（火灾爆炸预防与应急响应）的规范（HSE，1995a）包含了对主动和被动安全系统以及应急预案系统和功能的重要要求。这些规范的目的在于确保应对火灾和爆炸的措施能够产生符合最低合理可行原则的风险等级，并为处于所有合理可预测情况下的人员进行充分安排以提供良好的救援和撤离。根据这些规范，经营者需要：

- 采取预防火灾和爆炸的措施，并对发生的火灾和爆炸提供保护；
- 提供有效的应急响应安排。

风险需符合最低合理可行原则是涉及火灾和爆炸时使用基于风险设计的基础。

提供对处于所有合理可预测情况下的人员都能给予良好救援和撤离的设施，这种需求可能会以概率框架的形式出现，但却是不可靠的。实现这个需求的方法在于任何普通人认为是合理可预测的意外情况都视为合理可预测事件。这意味着考虑概率的空间非常小，如果意外情况能够发生，那么经营者必须以

确定的方式处理这种情况，作为提供“良好救援和撤离”的基础。如果不会发生，则必须停止相关活动直至这种情况可能出现。这主要涉及在严酷环境条件下提供“良好救援和撤离”的可能性。

1.6.3 管理与行政规范 Management and Administration Regulations

海上设施与管线工程（管理与行政）规范（1995b）（MAR）为海上设施的安全管理与行政制定了要求，比如工作系统许可证的使用。这些要求是遵从法规的重要规定，但是没有关于风险评估和管理的要求。

1.6.4 设计与施工建造规范 Design and Construction Regulations

海上设施与油井（设计和施工建造等）规范（1996）（DCR）旨在确保海上设施的完整性、离岸与岸上油井的安全性以及离岸工作环境的安全性。

1.7 国家和国际标准 National and International Standards

国际标准化组织（ISO）制定了少量的核心国际标准，反映了用于离岸业决策的基于风险方法。已发布的标准如下：

- ISO 10418：离岸生产平台基本水面安全系统的分析、设计、安装与测试（ISO，2003）；
- ISO 13702：离岸生产设施火灾和爆炸的控制与缓解——要求与指导准则（ISO，1999b）；
- ISO 15544：应急响应的要求与指导准则（ISO，2000a）；
- ISO 17776：危险识别与评估的工具和技术指导准则（ISO，2000b）。

国际标准化组织有责任修订及再制订涉及安全的重要 API 标准，比如 ISO 10418 取代了 API RP 14C。其他国际标准组织未曾制订过风险评估或基于风险设计的标准。但 OGP(原勘探与生产论坛)曾制订健康、环境与安全管理指导准则(OGP，1994)。其他重要的 ISO 标准有：

- 安全因素——将安全因素包含在标准中的指导准则，ISO/IEC Guide 51：1999(ISO，1999a)；
- 风险管理词汇表及在标准中使用的指导准则，ISO/IEC Guide 73：2002 (ISO，2002)。
- ISOWG 风险管理(制定中)；

本书使用的术语同 ISO/IEC Guide 73：2002 的术语是一致的。书后给出的定义取自这个标准的相关术语，见 660 页。

有几个关于健康、环境与安全管理的国家指导准则或标准，但此处并未包含。关于风险评估的唯一国家标准是挪威离岸标准化组织(NORSOK)文件：

- 风险及应急预案分析指导准则，Z-013(NORSOK，2001)。

本书内容基于 NORSOK 标准，如涉及术语的部分。NORSOK 标准所采纳的定义同目前挪威法规是有一些区别的，但本书选择了 NORSOK 的定义。

1.8 局限性 Limitations

本书重点是离岸风险评估，如离岸风险的分析以及结果的说明和评估。首先关注的是人员风险，其次为环境风险，最后才是资产风险。

由于关注的优先次序不同，有些领域没有得到关注或根本没有进行考虑。本节将对其中一些主题进行概述。

1.8.1 风险管理 Risk Management

风险管理在一本类似如《风险管理(Risk Management)》的书中有深入的讨论,并结合了离岸石油业的应用(Aven and Vinnem, 2007)。因而这个主题在本书中就不再进行阐述。

1.8.2 水下生产 Subsea Production

深水生产意味着将海底生产系统与浮式生产设施或直通岸上设施的管线进行连接。本书深入阐述了浮式生产设施及相关的危险。

水下生产系统通常距离水面设施相当远,这种情况下任何水下设施的失效都不会成为水面设施人员的风险源。失效可能导致碳氢化合物泄漏,并可能导致溢出及石油污染,这是本书讨论的范围。与这种泄漏相关的一个关键因素是探测泄漏,泄漏范围不大的话是很难探测到的。

水下生产设施的主要挑战是生产功能的可靠性,因为费用巨大,而且维护水下生产设施有时会造成延误。本书不考虑这方面的内容。

1.8.3 生产规则性 Production Regularity

同风险分析联系紧密的一个主题是规则性分析,不管是生产规则性还是/或运输规则性。这部分内容涉及资产风险,与人员风险及环境风险没有什么直接的联系。有些可能导致伤亡事故或溢出的危险事件也可能导致生产中断,从而对规则性产生影响。但传统上生产规则性研究不考虑这种在任何情况下都很少发生的事件。生产规则性不在本书研究的范围之内。

此外,根据上述内容,本书并没有完全涵盖“RAMS”(可靠性、可用性、可维护性和安全性)。

第 2 章　风险全解

——定义和特征

Risk Picture—Definitions and Characteristics

本章以定量方式对风险进行定义，并介绍风险的维度及因素。本章还对如何表达风险进行详尽说明。风险解读的深入讨论可见 Aven and Vinnem (2007)及 Aven(2003)。

2.1　风险的定义 Definition of Risk

2.1.1　风险的基本描述 Basic Expressions of Risk

根据国际标准(如 ISO 2002)，“风险”就是“事件及其后果的概率组合”。其他标准，如 ISO 13702(ISO 1999b)，也有类似的定义：“特定危险事件将会发生的可能性以及事件后果严重性的组合”。

风险可以通过分布、期望值、特定后果的单一概率等几种方法描述。期望值可能是使用得最多的。

以下是实际计算风险的运算表达式，通过对每个事故序列 i，计算出其后果的概率和数值的乘积，并对所有(I)潜在事故序列求和，突出说明了如何进行风险的计算：

$$R = \sum_{i} (p_i \cdot C_i) \tag{2.1}$$

式中：

p——事故概率；

C——事故后果。

这个公式将风险表达为期望后果。如果后果能用连续变量表达，公式也可用积分代替。

应该指出的是将风险表达为期望后果是一种统计学表达，常意味着数值在

实际中可能永远也观测不到。当处理罕见事故时,将不得不基于长期数据计算平均值,这样每年的数值就会比较低。如果 40 年内发生了 5 次重大事故,总共造成 10 人死亡,对应的年平均死亡数是 0.25,显然这是不可能观测到的。

式 2.1 中的定义有时称为“统计风险”或技术风险。有些作者也把这种表达称为“真实风险”或“客观风险”,后两个词会对解读风险造成误解。“风险”总能反映出人们的不同解释和简化,如分析师,这样就有一定程度的主观性。因此,可能会引起有些表达比其他表达更为客观的误解。

“风险规避”有时包含在风险的计算中(见式 2.9)。风险是事故概率、后果严重性以及同后果相关的规避的组合。作者不支持这一点,但承认风险规避是涉及风险评估,特别是同风险后果评估相关的一个重要方面。不过风险规避不应该混合在技术风险分析中。风险规避是一个复杂的现象,能够把这个复杂过程用一个单独的参数,即风险规避 a 来完全表达是要引起误解的。

关于风险定义、风险规避以及风险评估伦理调整的进一步详细情况可见 Aven and Vinnem(2007)。

2.1.2 风险的维度 Dimensions of Risk

考虑风险后果时,可能会涉及人员、环境以及资产和生产能力。有时这些被称为“风险的维度”,如下所示,还包括了一些下级分类:

- 人员风险:
  - 死亡风险(定义见第 2.1.3 节);
  - 损害风险(定义见第 2.1.4 节);
- 环境风险(定义见第 2.1.5 节);
- 资产风险(定义见第 2.1.6 节):
  - 物资损失风险;
  - 生产延误风险。

有人可能会认为死亡风险是伤害风险的子类,后者是总类。然而死亡风险和伤害风险的量化方法完全不同,将两者混为一类实为不妥。

需要注意的是人员风险主要关注死亡风险,或将死亡风险最小化的重要因

素。这反映在量化风险评估的重点是重大事故，而不是前言中介绍过的职业事故。而另一方面，这也强调了职业事故是死亡风险的一个重要因素。如在过去 20 年中挪威海上设施上的所有人员死亡都是由职业事故导致的。

对于“重大事故”一词并没有统一的定义。一个常用的解释：“重大事故”是可能导致 5 人或更多人死亡的事故。

也有人可能把“损害风险”视为“人员风险”的一个子类。损害风险将在第 2.1.4节进行更深入的讨论。这里完全可以说虽然损害机制涉及物理布置（如逃生通道），但也只是人员风险的间接表达。

2.1.3　死亡风险 Fatality Risk

死亡风险的评估使用了许多表达方法，如平台死亡风险、个体风险、群体风险以及频数（f-N）曲线。应该指出的是对于海上设施，其中一些表达方法要以特定的方式进行计算。主要选择以适合离岸的方式来表达风险，不同之处要进行说明。

2.1.3.1　平台死亡风险 Platform Fatality Risk

计算死亡风险首先要计算潜在人命丧失（PLL），有时也称为每平台年死亡数（FPPY）。如果针对整个海上设施进行计算，潜在人命丧失或每平台年死亡数就可视为整个海上设施的死亡风险。有两种方式可以表达潜在人命丧失：

- 事故统计，潜在人命丧失＝一段时间内的死亡数（通常为每年）。
- 死亡风险评估（通过量化风险评估），根据式 2.2 计算潜在人命丧失。

从潜在人命丧失可计算个体风险（IR）或群体风险（GR）。根据量化风险评估，潜在人命丧失的值可表达为：

$$PLL = \sum_{n} \sum_{j} (f_{nj} \cdot c_{nj}) \tag{2.2}$$

式中：

f_{nj}——事故场景（事件树终端事件）年频率 n，人员死亡后果类型 j；

c_{nj}——事故场景（事件树终端事件）的预期死亡数 n，人员死亡后果类型 j；

N——所有事件树的事故场景（事件树终端事件）总数；

J——人员死亡后果的所有类型，通常有立即死亡、逃生死亡、撤离及救援死亡。

涉及死亡风险分析的人员死亡后果类型可说明如下：

- 立即死亡　　在紧靠事故最初发生的地方发生，或在时间上紧随事故立即发生。
- 逃生死亡　　从工作地点撤退到庇护区（临时避难所）的过程中，在最初事故发生前或紧随事故立即发生。
- 撤离及救援死亡　　从海上设施撤离过程中或从海上和/或撤离设施上进行救援的过程中发生。

对于"逃生死亡"的使用可能需要进行适当的说明。有时（如在规范中）"逃生"指无法进行有序撤离时离开海上设施的过程。而另一方面"撤离"有时可用于表述从离开工作场所直至抵达安全地点的整个过程。本书不使用这些定义，而采用上文所述的解释。

如果假设因素之间的相关（依存）关系如下，意外场景的年频率 f_{nj} 可表述为：

$$f_{nj} = f_{\text{leak,n}} \cdot p_{\text{ign,n}} \cdot p_{\text{protfail,n}} \cdot p_{\text{escal,n}} \cdot n_{\text{nj}} \tag{2.3}$$

式中：

$f_{\text{leak,n}}$——泄漏频率；

$p_{\text{ign,n}}$——假定发生了泄漏，着火的条件概率；

$p_{\text{protfail,n}}$——假定发生了着火，安全保护系统比如紧急停车、放空、喷淋灭火、被动消防等的失效条件概率；

$p_{\text{escal,n}}$——假定泄漏着火并且保护系统响应失效，事故升级的条件概率；

n_{nj}——事故场景对死亡事故的影响（导致死亡事故的那部分场景）。

式 2.3 反映出 5 个主要屏障功能的失效：控制、防止着火、保护、预防升级以及预防死亡事故，进一步的讨论见第 2.5.2 节。

2.1.3.2　个体风险
Individual Risk

关于个体风险的表达，主要有两种选择：

- FAR(死亡事故率)；
- AIR(平均个体风险)。

平均个体风险也通过其他缩写为人所知，如 IR(个体风险)或 IRPA(每年个体风险)。在以下章节中将使用平均个体风险。

死亡事故率值为一个群体每 1 亿工作小时内的死亡数，而平均个体风险值为每个工作个体的平均死亡数。以下公式定义了如何对个体风险的表达进行计算：

$$FAR = \frac{PLL \cdot 10^8}{\text{工作小时}} = \frac{PLL \cdot 10^8}{POB_{av} \cdot 8\,760} \qquad (2.4)$$

$$AIR = \frac{PLL}{\text{工作个体}} = \frac{PLL}{POB_{av} \cdot \frac{8\,760}{H}} \qquad (2.5)$$

式中：

POB_{av}——年平均配员水平数；

H——每个个体年离岸小时数(当班时间及不当班时间)。

应当注意，一年的 h 数为 8 760。所以，8 760/H 之比就是个体满足离岸工作岗位要求所必须达到的值。挪威离岸作业中，通常每个岗位有 3 个人，所以每年的 H 值为 2 920h，当班时间 1 460h，不当班时间 1 460h。如果排班计划是两周(在海上设施上)“当班”，4 周“不当班”，每个岗位 3 个人还是需要的，这样每年在海上的周期平均为 8.7 个。

根据上述定义，平均个体风险和死亡事故率的值是非常相关的，式 2.6 说明了其关系：

$$AIR = H \cdot FAR \cdot 10^{-8} \tag{2.6}$$

如果 H 为 2 920h,FAR 为 5.0,那么 AIR 就等于 0.000 15。这样计算死亡事故率或是平均个体风险都是一样的。只要知道了排班计划,就可以从一个计算出另一个。

在岸上,H 就不应该是当班时间与不当班时间之和,因为不当班时间是不在工厂里的。

对不同的群体可以计算死亡事故率和平均个体风险的平均值,比如海上设施上的所有人员,或者同海上设施上特定区域相关的群体。

当针对离岸作业考虑死亡事故率定义中的"工作时间"时,至少能从 3 方面来解读这个表述:

- 当班时间(或工作时间)最常用于职业事故,都在工作时间内面临这些事故;
- 式 2.4 中海上设施上的总时间(当班时间加上不当班时间)最常用于重大事故,不管当班与否,都会持续面临这些事故;
- 当考虑直升机运送风险时,工作时间就是在直升机里的时间。

如果要计算不同作业死亡事故率的和,这些死亡事故率必须有相同的基础。这将在下文中进行深入讨论。

应该指出的是,到目前为止,所有挪威大陆架离岸工作的总时间每年才刚超过 3 000 万 h。这意味着在一个 3 年周期内,总共可以达到大约 1 亿 h。因而实际上我们可以说过去 3 年里观测到的死亡事故率值就是这个期间的死亡事故数。但这只能反映职业事故。如在 2003～2005 期间只发生了一起死亡事故(在一艘起重船上),这个期间的平均死亡事故率值就大约是 1.0。在此之前的 2000～2002 期间,对应的值为 5 起死亡事故。

2.1.3.3 实例:死亡事故率值的计算 Example: Calculation of FAR Values

对于海上设施,以下是用于构成表 2.1 中实例的主要参数:

- 平台上的平均人员数为 220;

- 每人的年离岸工作时间为 3 000h；
- 风险要素见表 2.1。

表 2.1　风险要素(实例)

位置/事故类型		平均配员	每起事故死亡数				
			1	2～5	6～20	21～100	101～220
生活区	职业事故	140	0.010	0			
	死亡事故，撤离	140	0.001	0			
生产/公用设备	职业事故	80	0.012	0			
	立即死亡事故	80	0.010	0			
	死亡事故，撤离	80	0	0	0.01	0.003	0.000 8
总计	职业事故	220	0.022	0			
	立即死亡事故	220	0.010	0			
	死亡事故，撤离	220	0.001	0	0.01	0.003	0.000 8
所有部分总计		220	0.033	0	0.01	0.003	0.000 8

表 2.1 说明了 5 组死亡事故的死亡后果频率。最后一行对职业事故、立即死亡事故及撤离死亡事故的不同影响进行了汇总，这意味着忽略了逃生和救援过程中的死亡事故。

汇总的结果被用作计算海上设施潜在人命丧失、死亡事故率及平均个体风险值的基础，如表 2.2 所示。海上设施的风险值如下：

- 潜在人命丧失(PLL)＝每年死亡数 0.386；
- 死亡事故率(FAR)＝每 108 工作小时死亡数 20.0；
- 平均个体风险(AIR)＝每年死亡数 $0.6 \cdot 10^{-3}$。

表 2.2　实例：潜在人命丧失、死亡事故率及平均个体风险的计算

风险值	平均配员	每起事故死亡数				
		1	2～5	6～20	21～100	101～220
频率总计	220	0.033	0	0.01	0.003	0.000 8
几何平均结果		1	3.2	10	44.7	148

（续表）

风险值	平均配员	每起事故死亡数				
		1	2～5	6～20	21～100	101～220
潜在人命丧失影响		0.033	0	0.1	0.134	0.118
潜在人命丧失总计	0.386					
死亡事故率值	20.0					
平均个体风险值	0.000 58					

2.1.3.4 群体风险 Group Risk

对风险最常见的定量是人员风险。经验表明，社会关心事故对社会总体上的影响。因而就需要对社会风险进行定量，比如事故对社会（或相关群体）的总体影响。这就是群体风险（GR）所要描述的。

接受准则常被用来描述个体风险等级，但有时也需要说明群体风险的可接受度，所以就有必要建立个体风险同群体风险之间的关系。

群体风险常根据频数（f-N）图进行说明，见本章后面的例子。以下推导说明在有限人员面临风险的情况下频数（f-N）图如何同个体风险度量建立关联。推导对 Schofield（1993）描述的表达式进行了归纳。这篇文章包含了对风险规避的考虑，下文复制了相关内容，虽然在大多数风险计算中并不推荐使用风险规避。

假设 POB 是海上设施上任何时候的人员数（在本例中假定不会改变）。

假设 F_N表示死亡数为 N 或更多的事故年频率。

假设 f_N表示死亡数正好为 N 的事故年频率。

然后就可以直接得到：

$$f_N = F_N - F_{N+1}, N = 1, \cdots, POB - 1 \tag{2.7}$$

$$f_N = F_N, N = POB \tag{2.8}$$

F_N有以下表达形式：

$$F_N = \frac{F_1}{N^b}, 1 \leqslant b \leqslant 1.3 \tag{2.9}$$

式 2.9 实际上对 $b \geqslant 1.0$ 的所有值都有效，但对其的解释中将 $b=1.3$ 视为上限(Schofield，1993)。系数 b 通常被称为“规避系数”，如上所述考虑到通常对于社会而言，接受死亡数为 10 的 1 个事故要比接受死亡数均为 1 的 10 个事故更为困难，即使前者的频率只是后者的 1/10，如当期望值是一样的情况下。取 $b=1.3$，$F_{10}=F_1/20$，而 $b=1.0$ 时，$F_{10}=F_1/10$。

建议将风险规避作为一个单独系数进行考虑，这样 b 就应该取 1.0。通常的表述就是 b 有可能超出 1.0，但建议在计算风险时不使用规避系数。以下公式的推导就基于 $b=1.0$。从式 2.7、2.8 和 2.9 可以得到：

$$f_N = F_1 \frac{1}{N(N+1)}, N = 1, \cdots, POB - 1 \tag{2.10}$$

$$f_N = \frac{F_1}{N}, N = POB \tag{2.11}$$

假设目前 AIR 为海上设施上一般员工的平均个体风险，作为每年死亡概率的表达。假设所有人员总共可分为 K 组群体，每个个体每年的离岸工作时间为 H 小时，这样就有：

$$H \cdot K = 8\,760 \tag{2.12}$$

通过合并，得到如下方程式：

$$\frac{1}{K \cdot POB} \sum_{1}^{POB} N \cdot f_N = AIR \tag{2.13}$$

合并式 2.10、2.11 和 2.13，得到：

$$F_1 = K \cdot POB \cdot AIR \left[1 + \sum_{1}^{POB-1} \frac{1}{N+1}\right]^{-1} \tag{2.14}$$

通过运用式 2.14，对于任意给定的 AIR、POB、K 和 b 值，可以确定其 FN 图。$N_1 \leqslant N \leqslant N_2$ 范围内的死亡事故频率通过以下方程式给出：

$$f(N_1,N_2)=\sum_{N_1}^{N_2} f_N = F_1\sum_{N_1}^{N_2}\frac{1}{N+1}, N_2 < POB \tag{2.15}$$

$$f(N_1,N_2)=F_1\cdot\left[\frac{1}{POB}+\sum_{N_1}^{N_2}\frac{1}{N(N+1)}\right], N_2 = POB \tag{2.16}$$

2.1.3.5 实例：频数(f-N)图转换 Example：f-N diagram Transformation

对第 2.1.3.3 节海上设施实例的潜在人命丧失、死亡事故率及平均个体风险值进行计算，并使用上述 F_1 的方程式可计算出 F_N 的值并绘制在图中。请注意频数(f-N)图的两个轴通常都使用对数刻度。频数(f-N)图说明了死亡数为 N 或更多的事故频率，图中记录的都是累积频率。

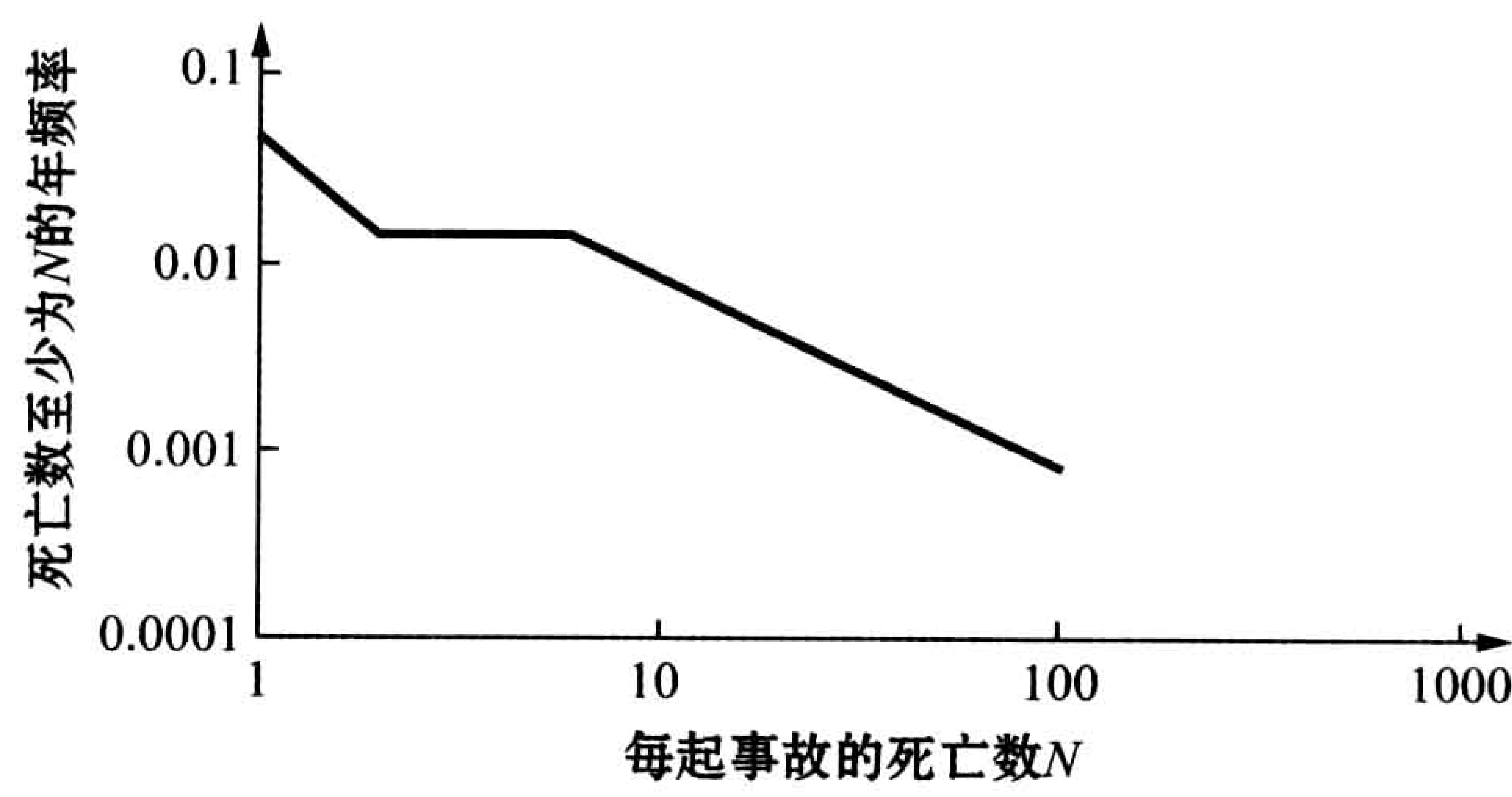


图 2.1　频数(f-N)图实例

2.1.4 损害的频率 Frequency of Impairment

损害频率是一种间接方法，用于说明对人员安全非常重要的风险状况。需要进行损害频率计算的方面通常称为“主要安全功能”或“安全功能”。如果发生重大意外事件，“主要安全功能”将有助于确保人员的安全。在计算损害频率时，可基于针对意外载荷响应的物理建模，这样就能避免对涉及死亡数的事故后果进行明确计算。

损害频率的计算常常是有些不同的，反映出英国和挪威法规的区别，但基本涵盖了相同的总体功能。在两国的法规中，主要安全功能的措辞有点区别。通常要计算以下内容：

- 英国：临时避难所的损害，包括下列功能（根据安全案例规范）：
  - ○ 生命支持安全功能；
  - ○ 指挥安全功能；
  - ○ 临时避难所出口安全功能；
  - ○ 撤离安全功能；
- 挪威：几种安全功能的损害（根据设施规范）：
  - ○ 庇护区损害；
  - ○ 逃生通道损害；
  - ○ 应急控制功能损害；
  - ○ 支撑机构损害；
  - ○ 升级功能损害。

这样在英国法规下，只需要定量确定一个损害频率，而在挪威通常要计算 5 个损害频率。但是涵盖的范围几乎是一样的。损害频率 $f_{\mathrm{imp\,i}}$ 计算如下：

$$f_{\mathrm{imp,i}} = \sum_{\mathrm{n}} f_{\mathrm{n}} \cdot p_{\mathrm{imp,n,i}} \qquad (2.17)$$

式中：

$p_{\mathrm{imp,n,i}}$——场景 n 安全功能 i 的损害概率；

N——事故场景总数。

2.1.5　环境风险 Environment Risk

海上设施的环境风险主要为井喷、管线泄漏或存储泄漏导致的大量溢出。生产泄漏虽然发生更为频繁，但一般不会对环境造成重大损害。环境风险的量化通常以下述方式之一进行表达：

- 预期泄漏量；
- 对环境造成类似后果的事件频率。

后果通常用恢复时间进行定量。“恢复时间”指发生溢出后环境恢复到溢出前的状态所需要的时间，这将在第 6.10 节进行更深入的探讨。以前经常使用“预期泄漏量”来表达。每年的预期泄漏量 Q_{sp} 可表达为：

$$Q_{sp} = \sum_{n} f_{n} \cdot q_{n,i} \tag{2.18}$$

式中：

q_{n}——场景 n 的泄漏量。

造成类似后果的事件累积频率 $f_{spill\ cons\ i}$（恢复时间）由下式估算：

$$f_{spill\ cons\ i} \underset{n}{=} f_{n} \cdot p_{n,i} \tag{2.19}$$

式中：

$p_{n,i}$——场景 n 造成环境后果 i 的概率。

2.1.6 资产风险 Asset Risk

资产风险由对设备和结构可能造成的损害以及所导致的生产中断组成。对物资损失和生产延误的风险表达是类似的。资产风险通常以下述方式之一进行表达：

- 对结构和设备的预期损害；
- 生产延误的预期持续时间；
- 在损害程度或生产延误时间上造成类似后果的事件频率。

每年的预期损害值（或预期生产延误时间）D 可表达为：

$$D = \sum_{n} f_n \cdot d_n \tag{2.20}$$

式中：

d_n——场景 n 的损害程度（延误时间）。

造成类似后果的事件累积频率 $f_{\text{damage cons i}}$ 由下式进行估算：

$$f_{\text{damage cons i}} = \sum_{n} f_n \cdot p_{D,n,i} \tag{2.21}$$

式中：

$p_{D,n,i}$——场景 n 造成损害后果 i 的概率。

就预期泄漏量而言，损害和生产延误的预期值完全是人为的值，事件虽不常发生，可一旦发生常常很严重。

2.2　风险因素 Risk Elements

2.2.1　人员风险 Personnel Risk

对于海上设施而言，考虑人员风险时只考虑雇员风险（历史上常称为第二方，现在一般称为第一方），而不考虑公共风险（第三方）。对于人员风险，以下可以认为是风险因素：

- 职业事故；
- 重大事故；

- 运送事故；
- 潜水作业事故。

这些是海上生产设施和移动式钻井平台的常见风险因素。要强调的是这些风险影响因素在统计上必须单独进行考虑。以下论述主要关注海上生产设施上的人员风险，并涉及通常应如何来看待这些风险。

从岸上运送人员也是经常需要考虑的。考虑这个问题有优有劣，一个缺点是涉及海上设施的重要变化可能会被运送的风险影响所掩盖。但对于直升机运送风险不会明显受离岸作业的影响仍然存在着争议。

在其他情况下，考虑运送风险的影响是非常有关系的，如对运送范围差别很大的两个油田开发计划进行比较时。另外一种意见认为直升机运送风险是离岸雇员的主要风险源，这样就必须对此进行考虑以说明面临的总风险。需要注意的是目前挪威法规实际上要求将直升机运送风险包含在离岸人员总体风险评估中。

2.2.2 针对环境的风险 Risk to Environment

以下涉及海上生产设施及相关作业的危险可能对外部环境造成损害：

- 平台上及海底生产设备的泄漏和渗漏；
- 生产排放水或其他排放物的过度污染；
- 井喷导致的大量溢出；
- 管线及立管的泄漏和破裂；
- 储油罐溢出；
- 穿梭油船事故导致溢出。

通常认为其中的第三、四、五项涉及海上设施。如果要考虑两个不同的运送方案，还必须包含列表中的第六项。前两个因素通常被认为是“作业排放”，不包括在环境风险评估中。

2.2.3 针对资产的风险 Risk to Assets

针对资产的风险通常被认为是事故造成的非人员、非环境后果，但可能会有潜在的人员和/或环境后果。需要指出的是在很多情况下针对资产的风险建模相对还很不充分。以下危险类型可能导致对资产有潜在损害的意外事件：

- 起火或未起火的碳氢化合物气体或液体泄漏；
- 其他液体泄漏起火，比如柴油、乙二醇、航空燃料等；
- 电气系统火灾；
- 生活区、住宿区等火灾；
- 起重机事故；
- 外部撞击，比如船舶碰撞、直升机坠落等；
- 极端环境载荷。

通常所有这些类型的意外事件都被包含在资产风险中。但是如果进行规律性（或生产规律性）分析的话，就有必要同这些分析保持一致。

规律性分析考虑所有可能导致生产能力损失的情况，包括计划维修及没有计划的维修。一些不太重要的意外事件可能同时被包含在两种类型的分析中，特别是公用设备系统。这没有问题，只要知道了这种情况，就可以在计算总值时减去重复计算的值。

表 2.3 简要列出了海上生产设施量化风险评估研究中通常如何考虑不同的风险因素，并区分为海上有人设施和无人设施。涉及物资处理及潜水作业的风险一般不在这种研究的范围之内。

2.3 风险呈现 Risk Presentation

对量化风险评估结果进行呈现的总体要求是应该尽量详细。量化风险评

估通常可产生许多详细的结果，但是却很少提供给读者。

量化风险评估结果呈现的主要目的是对风险影响和风险机制的相关比较进行阐述，用以说明风险的因素，所以应呈现尽可能多的细节和内容。表 2.3 是结果呈现的一些总体原则。

表 2.3　海上生产设施的风险因素

风险因素	海上有人设施	海上无人或通常无人设施	说　明
海上设施上发生的事故	职业事故	职业事故	
	重大事故	重大事故	包括所有类型的事故，涉及碳氢化合物泄漏、外部撞击以及环境载荷
运送过程中发生的事故	直升机从岸上运送人员过程中发生的事故	直升机从岸上运送人员过程中发生的事故	根据挪威规范，对于离岸员工必须包括
		在海上无人设施和海上有人设施之间来回运送过程中发生的事故	对于通常海上无人设施一般需要包括
	供应物资处理及从岸上运送过程中发生的事故	供应物资处理及从岸上运送过程中发生的事故	一般不包括
潜水事故	不包括	不包括	一般为专用船所考虑，固定式海上设施不考虑

除了对结果进行总体呈现外，最重要的是通过各种方法来说明对风险的影响。以下各节将介绍能够呈现风险的大多数相关方法，包括下列参数产生的影响：

- 不同类型的场景；
- 基于 MTO(人、技术和组织)角度的失效类型；
- 对风险产生影响的活动类型；
- 导致产生真实场景的屏障失效；
- 事故最初发生的位置；
- 事故发生的相关原因(可能的话)。

2.3.1 死亡事故风险 Fatality Risk

2.3.1.1 概述 Overview

死亡事故风险应至少使用以下参数进行呈现，无论是否针对这些参数制定了风险接受准则：

- 潜在人命丧失(PLL)：潜在人命丧失说明了整个海上设施每年所面临的风险，所以是总体风险的一个重要度量标准。
- 死亡事故率(FAR)/平均个体风险(AIR)：死亡事故率或平均个体风险是可选择的个体风险表达方式，因而是潜在人命丧失值的补充。死亡事故率和平均个体风险通常是群体的平均值，比如对于所有人员及较小的群体。挪威规范要求为面临风险最大的人员计算其风险值。
- 群体风险：通常用频数(f-N)图进行呈现(如图 2.2 所示)。

需要指出的是，有时需要对海上设施上特定群体在执行特定作业期间的潜在人命丧失进行呈现，这样就可能偏离上文所述的应该针对一年中一个海上设施的所有人员。所以明确说明潜在人命丧失的涉及范围就非常重要，如什么群体及作业持续时间等。

2.3.1.2 潜在人命丧失(PLL) Potential Loss of Life (PLL)

潜在人命丧失可通过源自不同危险的不同风险影响进行呈现，如表 2.4 所示。

表 2.4 还依据每起事故的死亡数说明了事故的相关影响及平均值。

表 2.4 不同事故类型对潜在人命丧失的影响

危险类型	年潜在人命丧失值	%	死亡数/事故
井喷	$4.1 \cdot 10^{-3}$	27.3	5.3
生产事故	$9.6 \cdot 10^{-4}$	6.4	0.7

（续表）

危险类型	年潜在人命丧失值	%	死亡数/事故
立管、管线事故	$5.3 \cdot 10^{-3}$	35.3	4.1
外部事故	$2.3 \cdot 10^{-4}$	1.5	1.4
职业事故	$2.6 \cdot 10^{-3}$	17.3	1.1
直升机事故	$1.4 \cdot 10^{-3}$	9.3	2.8
所有类型总计	$1.5 \cdot 10^{-2}$	100	2.3

图 2.2 说明了不同事故的意外影响占所有潜在人命丧失的比例：

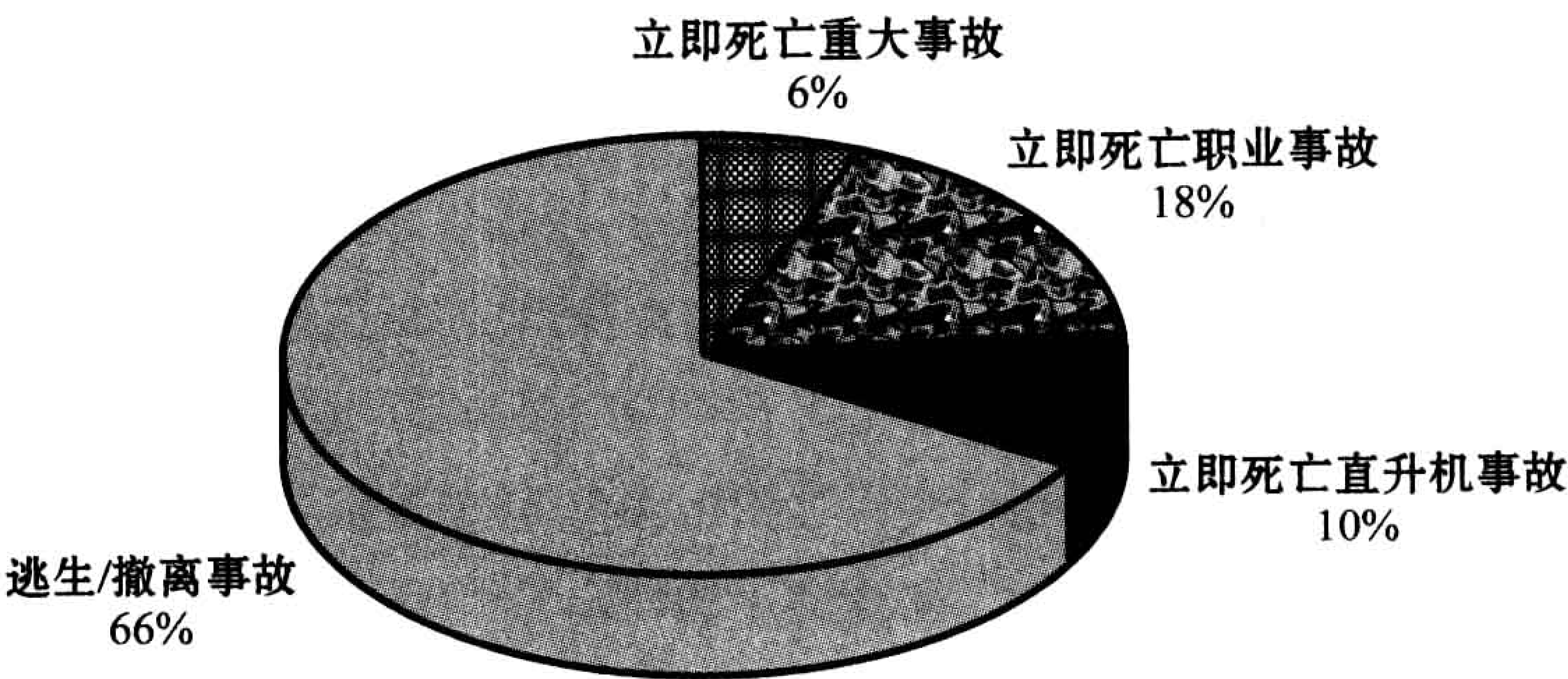


图 2.2　不同事故类型占潜在人命丧失的比例

- 立即死亡事故：
  - ○ 职业事故；
  - ○ 重大事故；
- 直升机事故；
- 逃生和撤离过程中的事故。

“立即死亡事故”为始发事件直接后果所导致的死亡事故，不是重大事故就是职业事故。在职业事故的情况下几乎所有死亡事故都是“立即死亡事故”。

2.3.1.3　平均死亡事故风险 Average Fatality Risk

对死亡事故率/平均个体风险的相对影响通常与对潜在人命丧失的影响相同。死亡事故率或平均个体风险的呈现应考虑以下情况：

- 针对位于海上设施每个主要区域的人员；
- 针对每个主要人员群体；
- 不同事故类型对总风险的影响；
- 不同事故阶段对总风险的影响。

图 2.3 说明了平台不同区域的典型死亡事故率值。对此至少应该呈现：

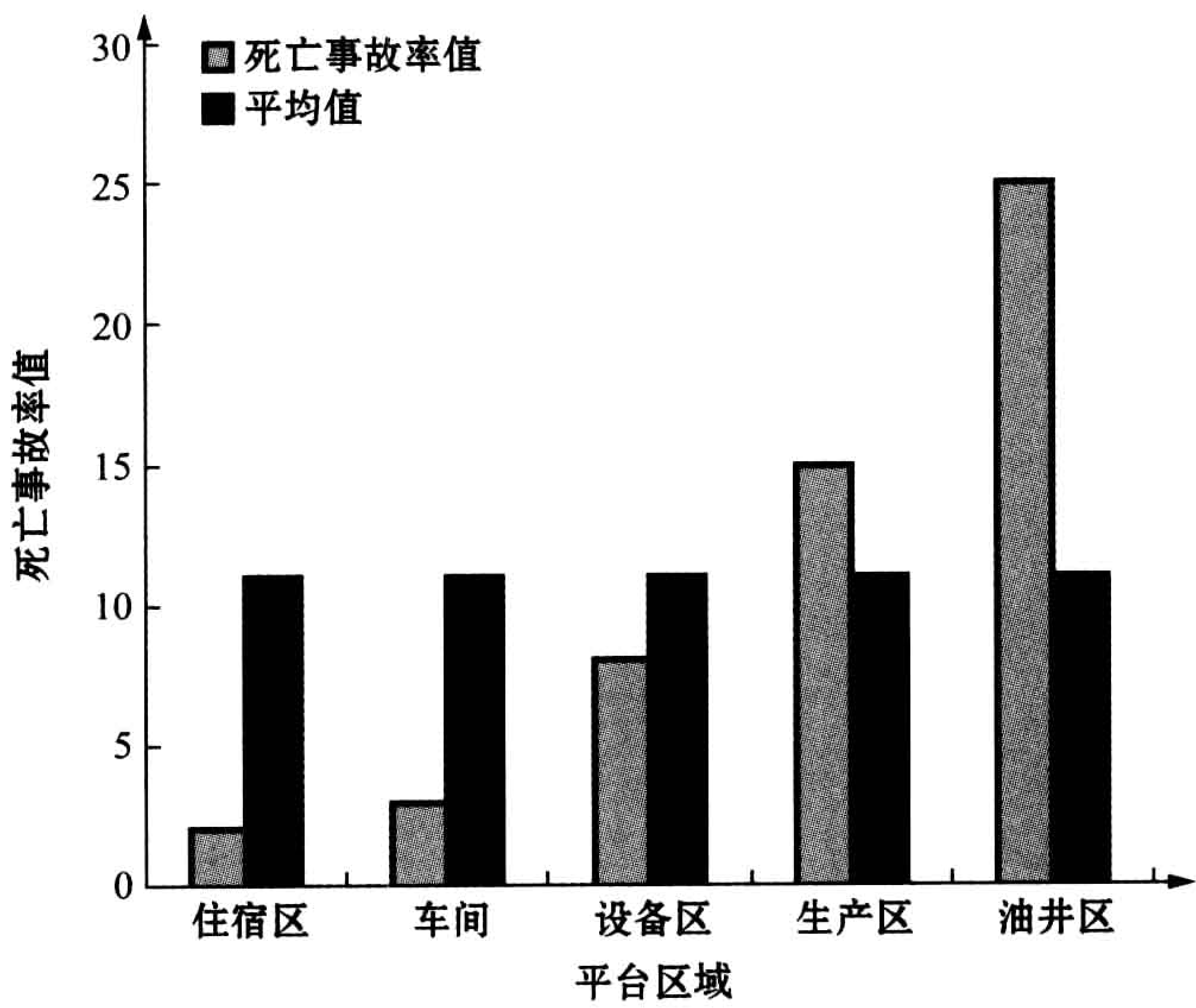


图 2.3　不同平台区域的死亡事故率值及平台平均值

- 当班及不当班时间都在住宿区的人员死亡事故率值；
- 当班时间在海上设施的“危险”区域（比如在住宿区之外），而不当班时间在住宿区的人员死亡事故率值。

使用死亡事故率（FAR）或平均个体风险（AIR）来比较不同的概念或不同的布局方案通常是很合适的。但另一方面，也有一些方案不适合比较死亡事故率（或平均个体风险）值。这种情况的例子为比较：

- 涉及不同人员数的油田开发选择方案；

- 差别非常大的油田开发选择方案，如用单独设施或是已有海上设施开发新油田，后者可能需要进行大量的调整。

必须在这些情况下用潜在人命丧失进行比较以理解总体风险，如下面的例子所述。

2.3.1.4 基于活动的死亡事故风险变化情况 Activity-Based Variations of Fatality Risk

不同活动的死亡事故率等级差别很大。图 2.4 说明一个工人参与油井修理及生产作业的平均死亡事故率等级的变化情况，还显示了短暂的直升机运送过程中的死亡事故率等级。此外，这个工人只面临涉及结构失效的风险，以及在住宿区睡觉时可能会发生的所有人员撤离情况。全天在住宿区工作的办公室人员也会面临这种比较低的风险等级。应进一步注意以下情况：

- 显示的实际值是典型值，根据平台情况可能会有很大的变化。
- 显示的直升机运送死亡事故率等级（每 108 人员飞行小时死亡数为 140）是目前北海的直升机风险等级（见第 3.1.5 节）。
- 显示的油井修理死亡事故率涉及中等危险作业。其他油井修理作业的死亡事故率值可能高达直升机飞行的死亡事故率值，但通常这些作业的持续时间相对比较短。

2.3.1.5 死亡事故率值的计算 Adding of FAR Values

应注意的是只有当死亡事故率值用于相同时间段时才能累加。图 2.4 显示的死亡事故率值不能累加，但可以通过以下方法对 24h 时间段的总死亡事故率进行计算：

$$FAR_{tot} = \sum FAR_i \cdot t_i \qquad (2.22)$$

式中：

FAR_{tot}——一个工作日的总死亡事故率值；

FAR_i——时间段 i 的死亡事故率值；

t_i——时间段 i 的持续时间。

对面临图 2.4 风险的平台工人每天平均死亡事故率的计算见表 2.5。

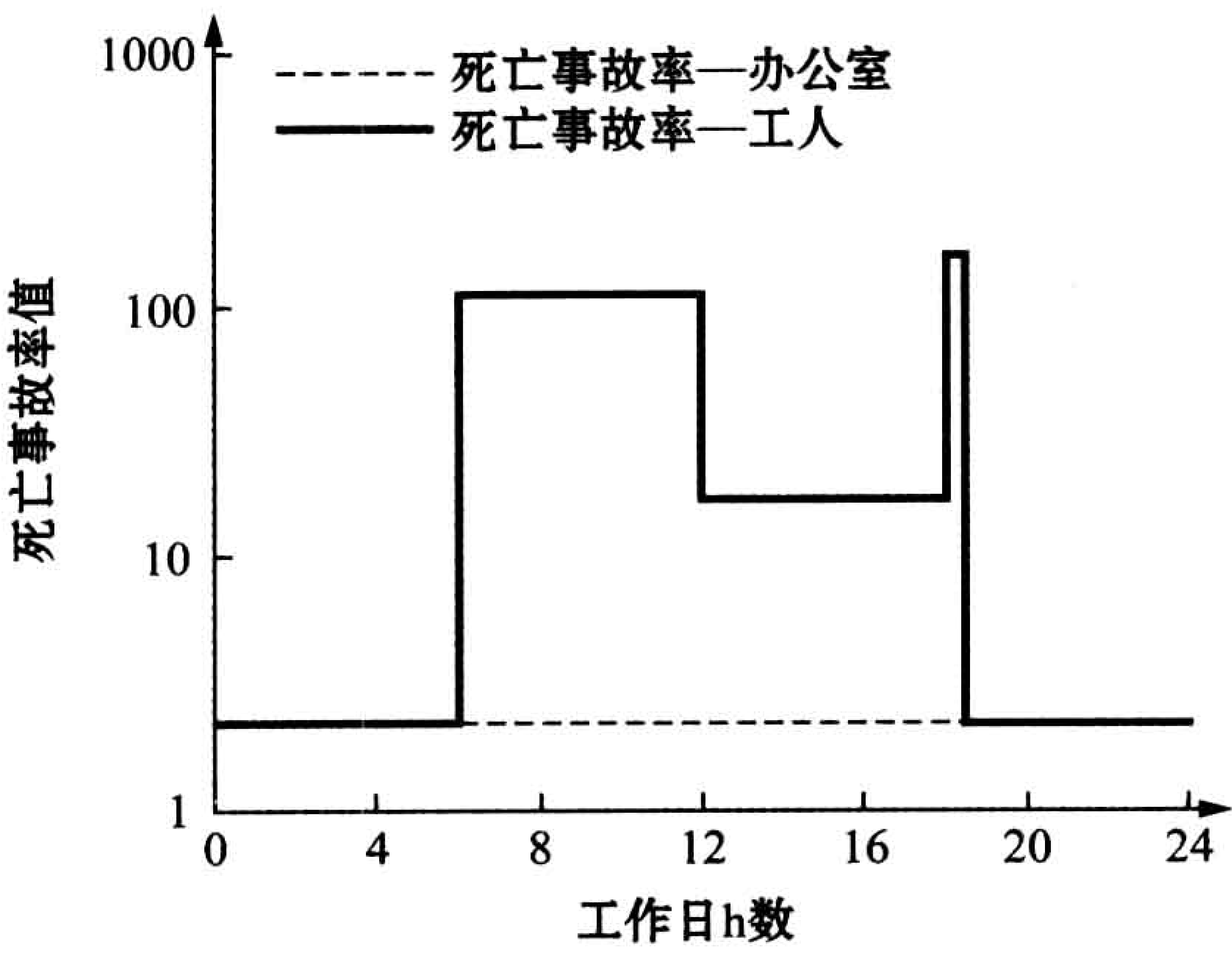


图 2.4　根据实施的作业，死亡事故率的变化情况

一个工人一个工作日的潜在人命丧失值为 0.89 • 10^{-5}(每天)，与每天平均死亡事故率值 36.9 是一致的。

表 2.5　离岸工人每天平均死亡事故率的计算

活　动	死亡事故率	持续时间/h	潜在人命丧失/$\times 10^{-8}$
睡觉	2.28	6	14
油井修理	114.2	6	685
生产作业	17.12	6	103
直升机运送	140	0.5	70
睡觉	2.28	5.5	13
值总计	36.9	24	885

2.3.1.6　实例：油田开发计划的比较
Example: Comparison of Field Development Schemes

油田的一个固定式海上设施已经投产几年，主要生产石油及一些伴生天然气。现已发现油田的另一部分，也是石油及伴生天然气，开发这部分油田有两

个选择：

- 将海底油井同现有固定式海上设施相连；
- 浮式生产储卸装置(FPSO)。

在此情况下，比较的重点是因新油田生产可能导致的额外潜在人命丧失，包括调整阶段及其余的生产周期。如果使用海底方案，现有海上设施将涵盖新的油田生产，那么就需要考虑以下方面：

- 调整阶段死亡事故风险的增加；
- 因新设备导致生产阶段死亡事故风险的增加；
- 调整和生产阶段人员数量的增加。

这种情况下潜在人命丧失总值增加了，然后将其同浮式生产储卸装置的潜在人命丧失值进行比较。两种情况都不考虑建造车间对工人可能造成的死亡事故风险。如果考虑的话，浮式生产储卸装置方案将增加更多的风险，因为建造一个新船体需要在车间里增加相当多的工时。图 2.5 显示了对两种可选择开发场景所进行的潜在人命丧失计算。

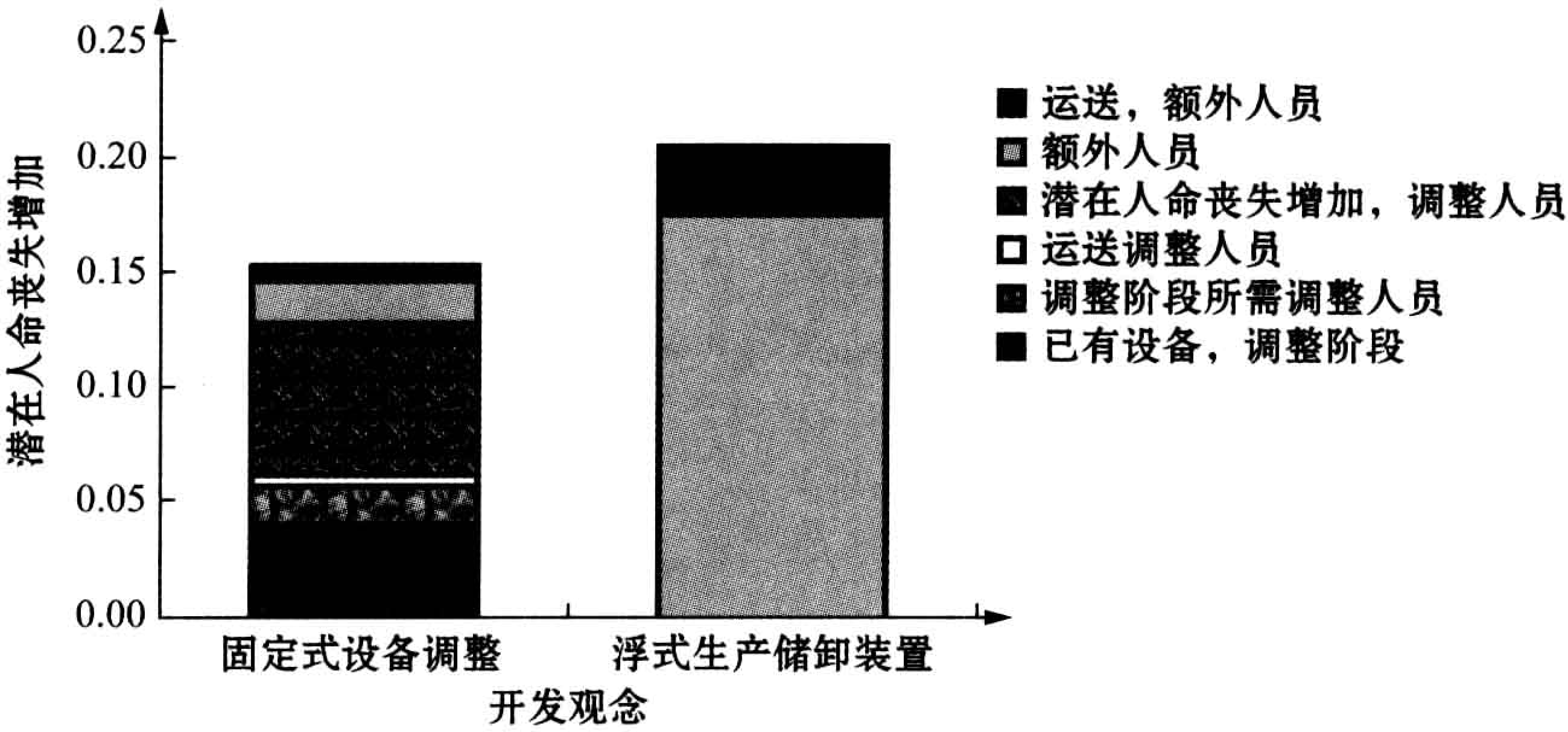


图 2.5　两种不同油田开发观念潜在人命丧失增加的比较

浮式生产储卸装置方案在油田开发及其余生产阶段的潜在人命丧失要高33%，主要是因为有更多的人员面临离岸风险。

这个例子假定调整阶段需要增加的人员都能生活在海上设施上，如能额外提供 100 张床。一些海上设施有这个能力，但不是所有海上设施。以下是可选择的解决办法：

- 在浮式住宿船和固定式海上设施之间架桥连接，以增加住宿能力；
- 每天从岸上或附近平台来回运送额外人员到平台上。

这些解决方法对风险有很大影响，如下文中的一个实例所述。

2.3.1.7　实例：浮式住宿船与直升机来回运送比较 Example：Flotel vs Helicopter Shuttling

当进行离岸调整或连接时，有时不必安排所有工作所需人员都住宿在海上设施上。于是就要选择将人员运送到岸上或其他海上设施上，或者在平台附近提供用桥连接的浮式住宿船。

图 2.6 说明了死亡事故风险（潜在人命丧失）的不同。这是对图 2.5 的补充，假设调整阶段所需的额外人员不能住宿在固定式海上设施上，只能运送到岸上或住宿在用桥连接的浮式住宿船上。图 2.6 显示了两种选择方案的生命周期潜在人命丧失总值。

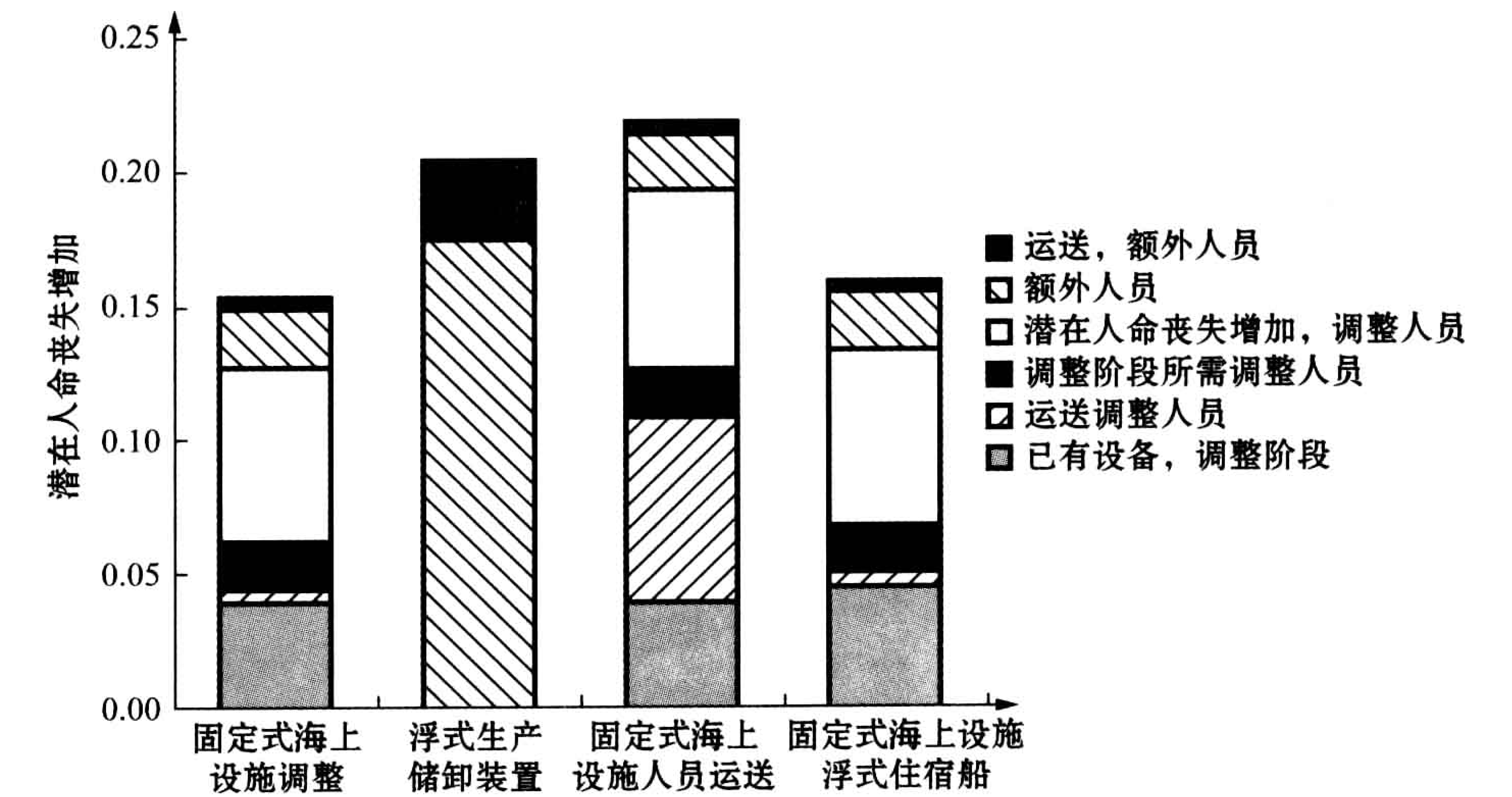


图 2.6　运送人员和浮式住宿船开发方案的比较

如果所有人员每天都必须运送到岸上的话，生命周期风险几乎要增加50%。这种程度的人员运送代价太高，不是正常的解决方法，但可以用于说明最极端的情况。如图 2.6 所示，其潜在人命丧失值在图中是最高的，而提供额外床位的浮式住宿船方案的潜在人命丧失值几乎同单独使用固定式通用海上设施的方案一样低。

2.3.2 群体风险 Group Risk

群体（或社会）风险的死亡数可用频数（*f*-*N*）曲线予以呈现。第 2.1.3.3 节介绍了频数（*f*-*N*）函数，并且还对包含风险规避的可能性进行了探讨。以下讨论最初将不涵盖风险规避，但会说明风险规避的重要性。图 2.7 显示了频数（*f*-*N*）图的通常图形，频数（*f*-*N*）图是对累积函数进行绘图的一种特定方法。

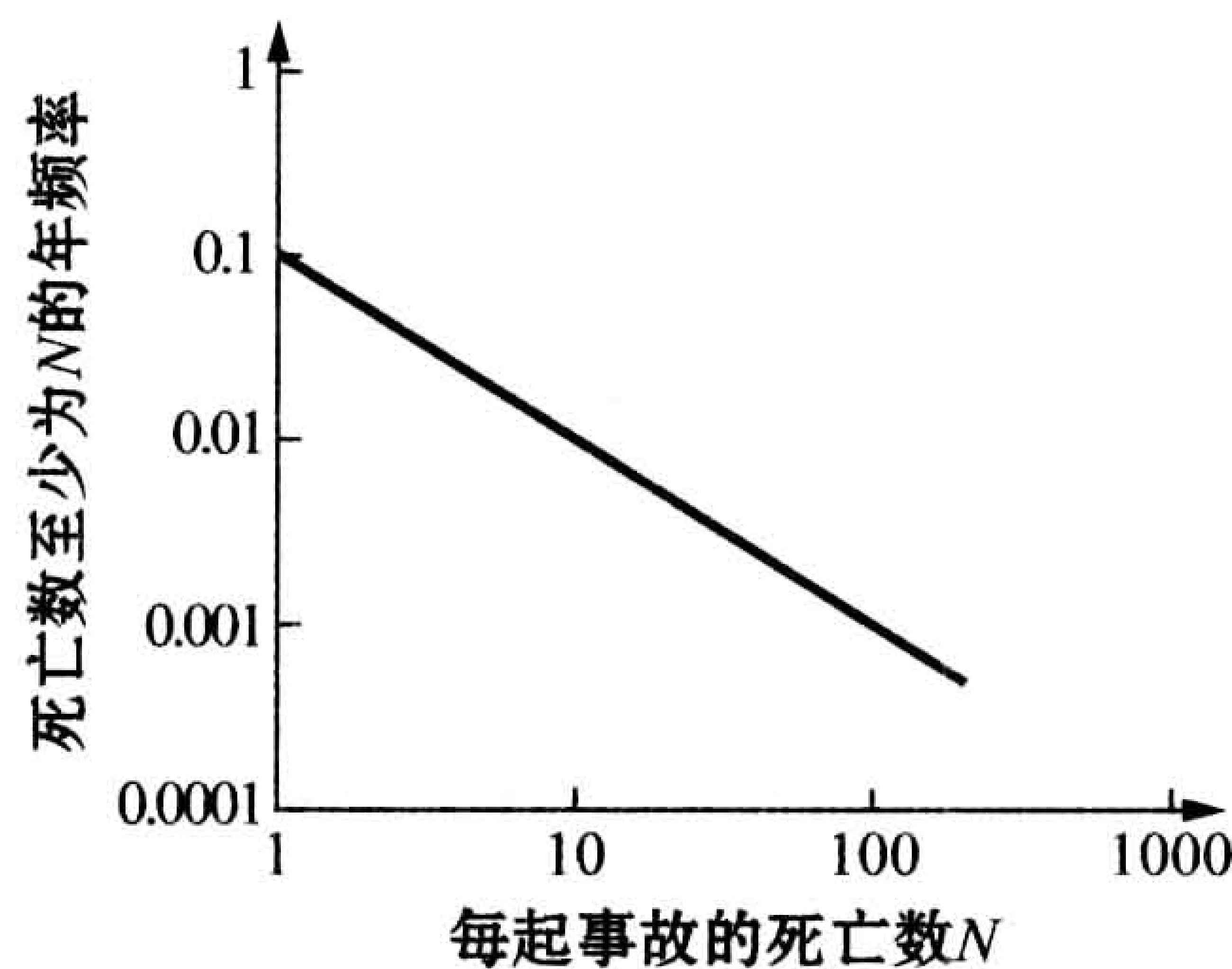


图 2.7 频数（*f*-*N*）图，双对数刻度

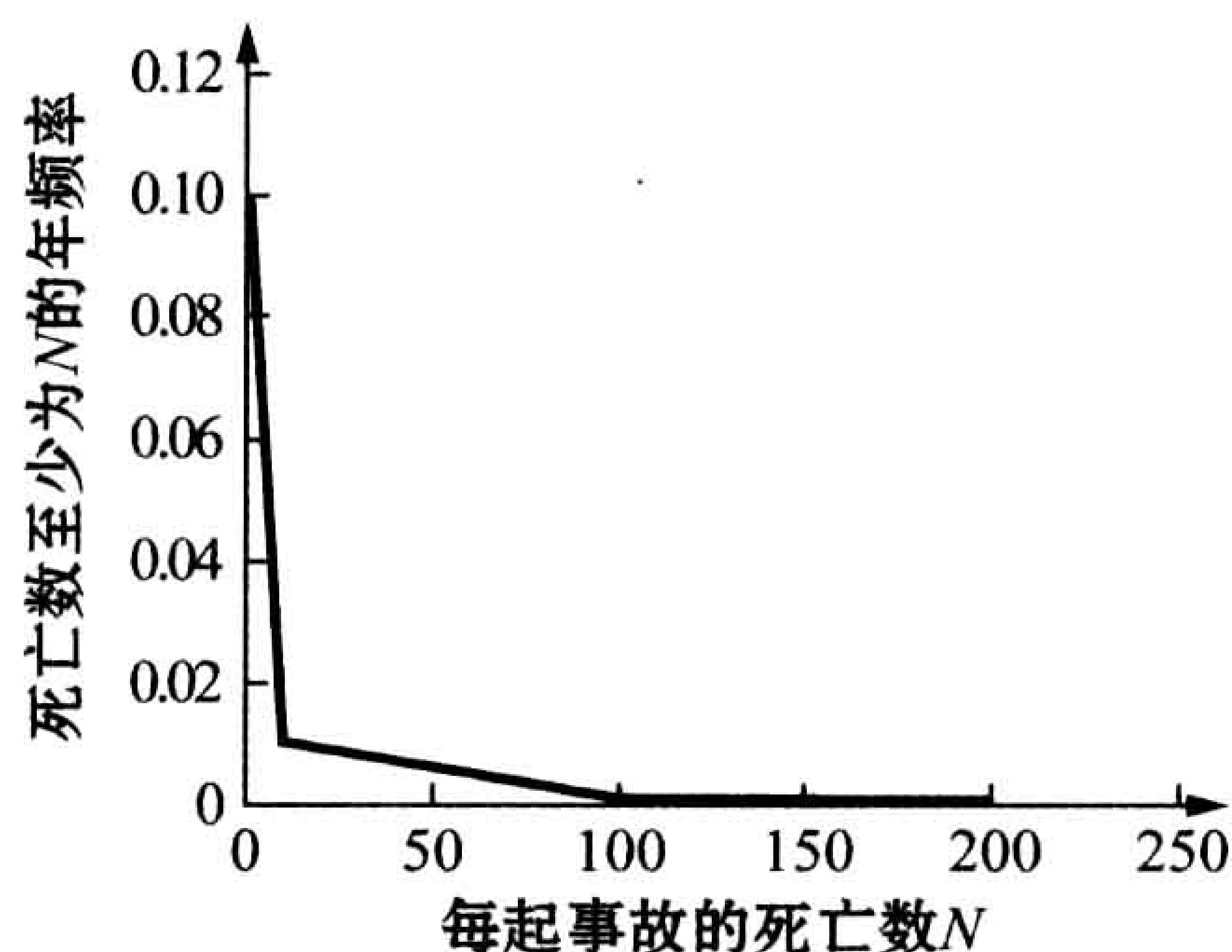


图 2.8 频数（*f*-*N*）图，线性刻度

应该注意的是频数（*f*-*N*）图两个轴的绘制通常都需要使用对数刻度，因为两个轴的数值范围经常涉及几个数量级。一般死亡数的范围从 1 到任意时间设备上的最多人员数，大型海上设施上可达数百人。图 2.8 是如果在两个轴上都使用线性刻度所显示的图形。图 2.9 是一个平台量化风险评估的实例。

下两张图（图 2.10 和图 2.11）显示了频数（*f*-*N*）图的重要方面。如果包含了风险规避，第一张图说明了风险规避的重要性。图 2.10 的曲线是根据以下条件绘制的：

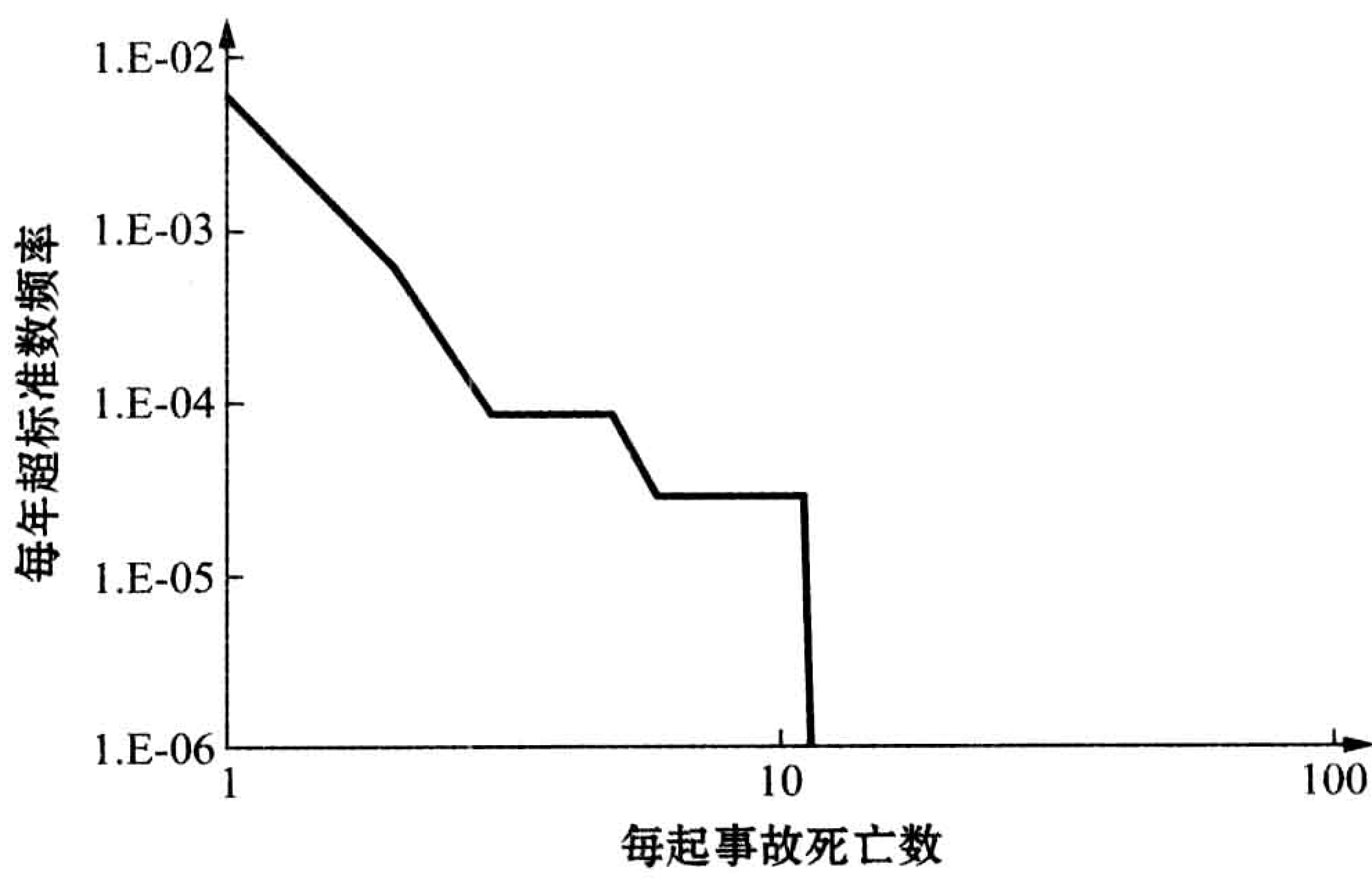


图 2.9 海上设施的频数（f-N）曲线，所有死亡事故

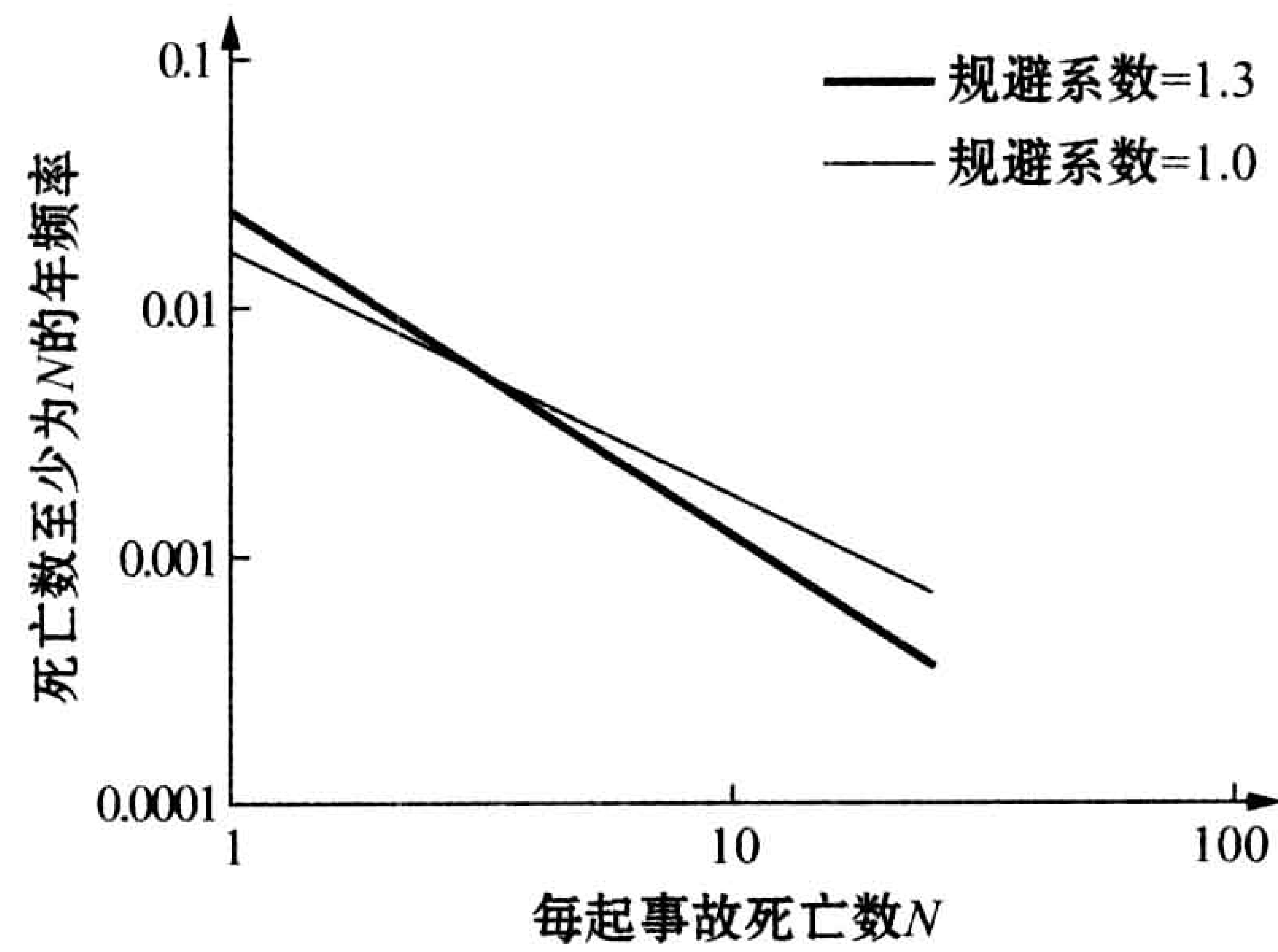


图 2.10 作为规避系数的函数，群体风险曲线的变化情况

- 人员总数：25；
- 平均个体风险的可承受上限：每年 $1 \cdot 10^{-3}$；
- 离岸小时数：每年 3 200h（50%当班，50%不当班）。

根据风险规避的程度，绘制了两条曲线以说明变化情况，范围从不规避（$b=1.0$）到最大规避（$b=1.3$）（见第 2.1.3.4 节）。两种情况的区别看起来可能并不大，但对于死亡数至少为 20 的事故而言，差别系数达 1.8（每年 0.000 9 对 0.000 5）。

绘制图 2.11 是为了显示平均个体风险（死亡事故率也是同样情况）的不同可承受上限值在有限数量的人员面临风险时是如何影响频数（f-N）图的，其中

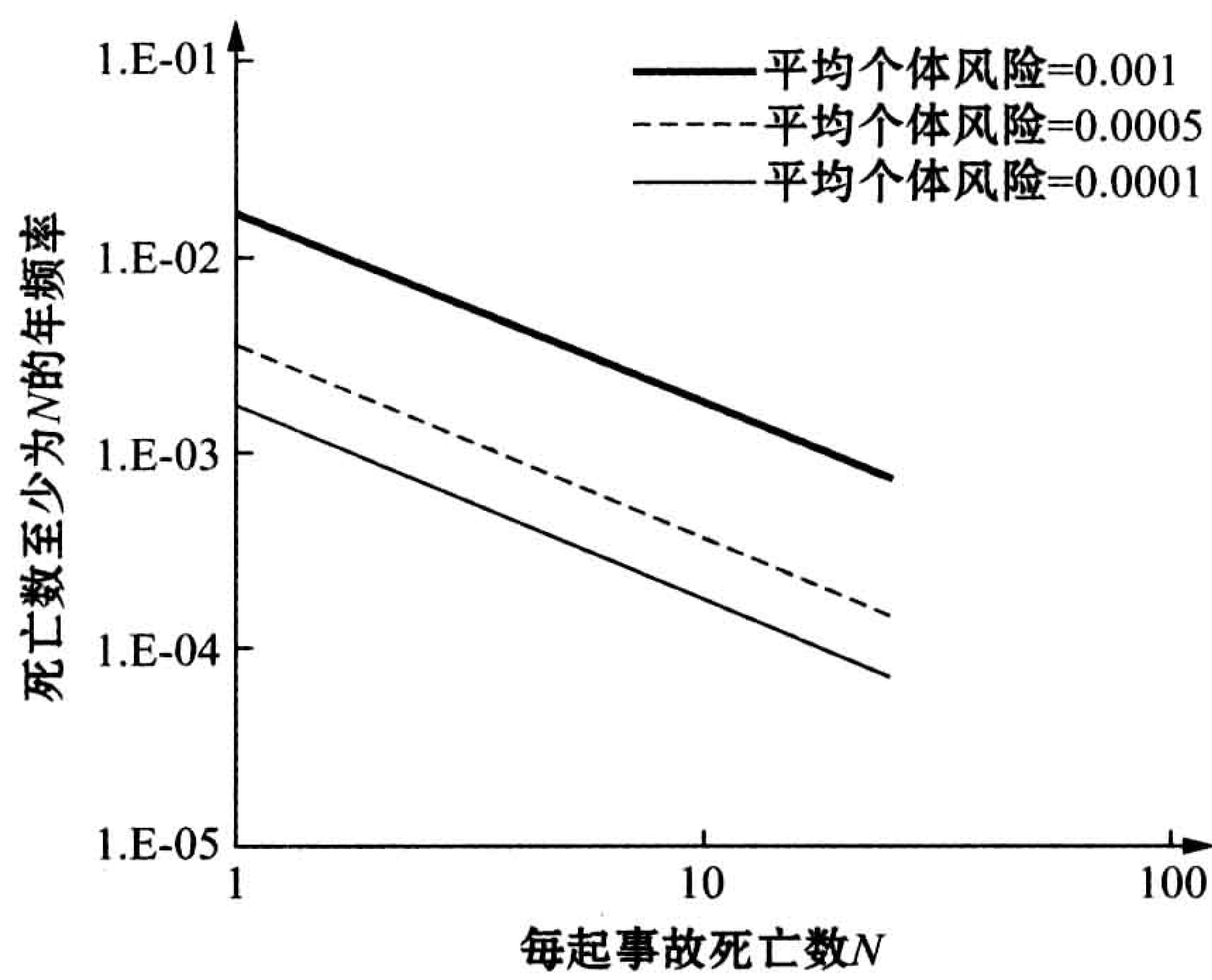


图 2.11　平均个体风险不同上限值的群体风险曲线

不包含风险规避。

从图中明显可以看出其值同平均个体风险(或死亡事故率)值呈线性关系，这在式 2.14 中也是很明显的。

2.3.3　损害风险 Impairment Risk

损害风险通常涉及称为“主要安全功能”的损害。一般定义的安全功能有 3～5 个，每个安全功能都有单独的损害频率，因而这些频率应单独进行表达。表 2.6 说明了对井口平台逃生通道年损害频率产生影响的典型危险类型。

表 2.6　年损害频率，逃生通道

危险类型	年损害频率	%
井喷	$7.3 \cdot 10^{-5}$	48.5
生产事故	$8.2 \cdot 10^{-6}$	5.4
立管、管线事故	$1.97 \cdot 10^{-5}$	13.0
外部事故	$5.0 \cdot 10^{-5}$	33.1
所有危险类型总计	$1.51 \cdot 10^{-4}$	100

如同挪威规范的要求，逃生通道的损害在表中通过危险类型来表达。表中还显示了总值，但这不是挪威规范的要求。逃生通道的损害有时可在“每个区域”的基础上进行表达。

2.3.4 针对环境的风险 Risk to Environment

表 2.7 所示为对环境风险后果进行表达的一种方法。表格必须附有风险后果类型的定义。这些通常都是基于对海岸线的影响，要牢记以下方面：

- 到达海岸的油量；
- 受溢出影响的海岸线长度；
- 受到影响的具有特殊环境价值（包括有独特价值的区域）的区域范围。

表 2.7 环境损害年频率，用于溢出影响类型

环境后果类型	对应的溢出量/t	年频率
轻微影响	10	$3.4 \cdot 10^{-3}$
中等影响	500	$8.6 \cdot 10^{-4}$
重大影响	10 000	$9.7 \cdot 10^{-6}$

有时可将每年的预期溢出量（在溢出源或者到达海岸）作为风险的一种度量。如果使用了对应于表 2.7 后果类型的溢出量定义，其值就可能为比如每年 0.56t。很明显这种值对于预测几乎没有任何意义。如果考虑重大事故的话，任何一年都不会出现像 0.56t 溢出量这样的情况。溢出量要么为零，要么就是相当大。当概率非常低时预期值实际上是没有用处的，造成了后果的值都非常高。这适用于对将来的溢出进行预测。对于一些其他目的，比如观念或系统的比较，预期值可能非常有帮助。

还有另一个方法可以呈现针对环境的风险，就是通过使用矩阵表达，如图 2.12 所示，矩阵使用了以下后果类型：

- 轻微损害：<2 年；
- 较小损害：2～5 年；
- 中等损害：5～10 年；

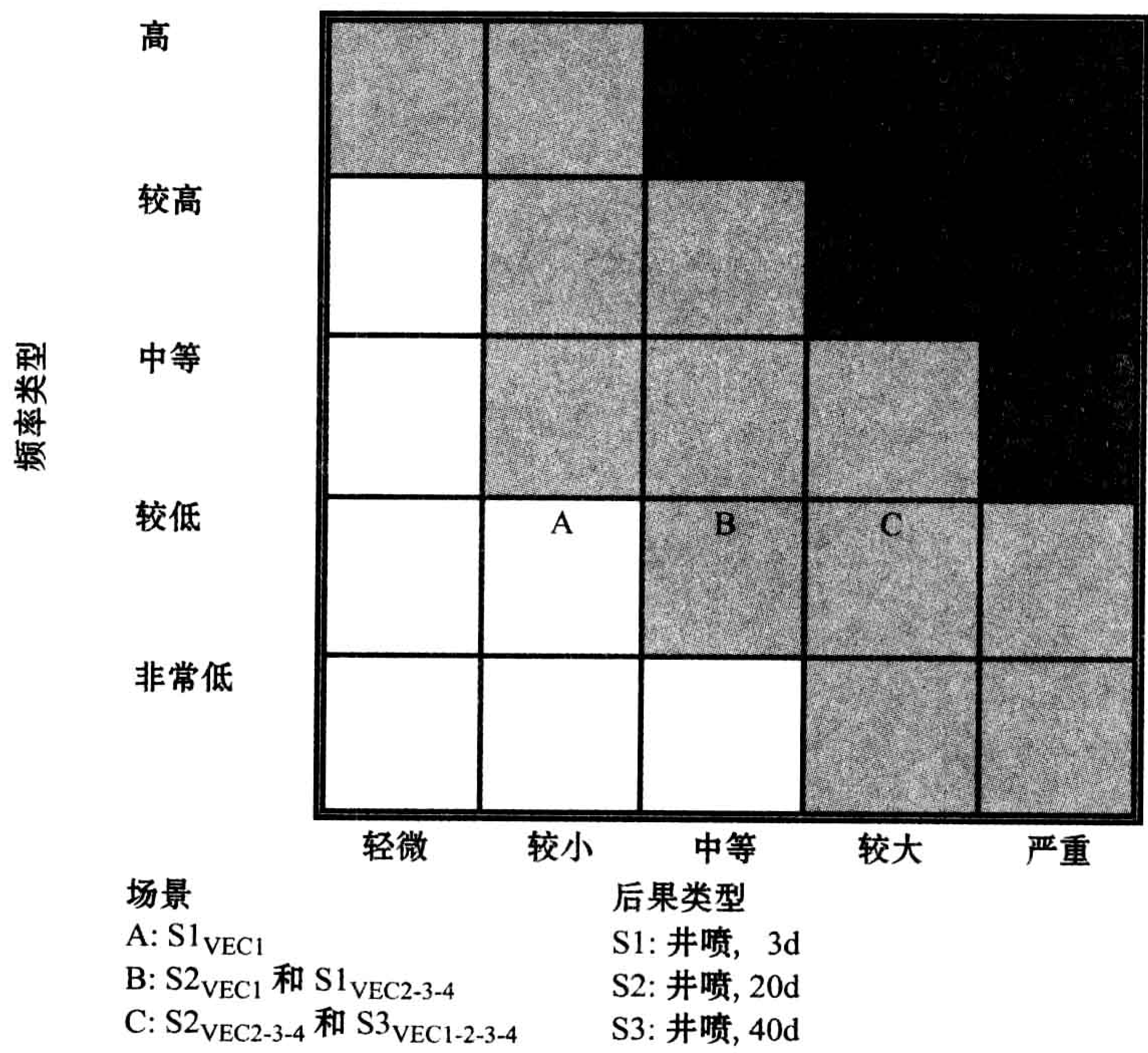


图 2.12 绘制了风险后果的风险矩阵

- 较大损害:10～20 年;
- 严重损害:>20 年。

还可以选择一些其他后果呈现方法。井喷场景 S1、S2、和 S3 说明了不同的持续时间,如图所示。考虑了 4 种重要生态组成部分(VEC),表示为 VEC1、VEC2、VEC3、和 VEC4。每种重要生态组成部分的每个后果类型的频率都不相同,在矩阵中表示为结果落入方框 A、B 和 C。

2.3.5 资产风险 Asset Risk

通常对资产风险的两个维度分别给予呈现,即物资损失风险和生产延误(生产延期)风险。实际上如果将二者转换为货币价值的话,生产延误经常要远远超过物资损失。表 2.8 是物资损失风险对井口平台造成影响的一个例子。

生产延误风险可用许多方法进行呈现：

- 预期值，比如由于事故导致的每年预期延误情况；
- 不同程度后果的频率，类似于上述对物资损失的呈现，见方程式 2.21；
- 超标准数图形显示某一特定持续时间或更长时间延误的累积频率。

表 2.8　年物资损失频率

危险类型	年损失频率		占总损失百分比
	部分损失	全部损失	
井喷	$1.07 \cdot 10^{-3}$	$2.61 \cdot 10^{-4}$	79.8
生产事故	$2.06 \cdot 10^{-3}$	$5.76 \cdot 10^{-6}$	1.8
立管、管线事故	$1.62 \cdot 10^{-4}$	$1.04 \cdot 10^{-5}$	3.2
外部事故	$9.62 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-5}$	15.3
所有危险类型总计	$1.29 \cdot 10^{-2}$	$3.27 \cdot 10^{-4}$	100

通常会对 4 或 5 种损失类型给予呈现，以下类型为 WOAD® 数据库所使用（WOAD，1994），一定程度上可视为“标准”类型：

- 全部损失　　从保险的角度来看，平台全部损失，包括推定全损。平台需要修理才能再次投入作业。
- 严重损失　　平台的一个或多个模块严重损害，承载结构较大/中等损害，重要设备严重损害。
- 较大损失　　平台模块及局部区域较大/严重损害，几台重要设备损害，一台重要设备较大损害，承载结构轻微损害。
- 轻微损失　　几台非重要设备损害，一台重要设备轻微损害，非承载结构损害。
- 不重要损失　　不重要或无损害，重要设备零件损害，拖缆、推进器、发电机及传动装置损害。

图 2.13 是生产延误的超标准数图示。显示有 3 条曲线：所有事故曲线以及两种影响最大的事故曲线——井喷事故曲线和生产事故曲线，其他事故曲线没有显示。应注意的是对于超过标准数曲线，预期值可表达为：

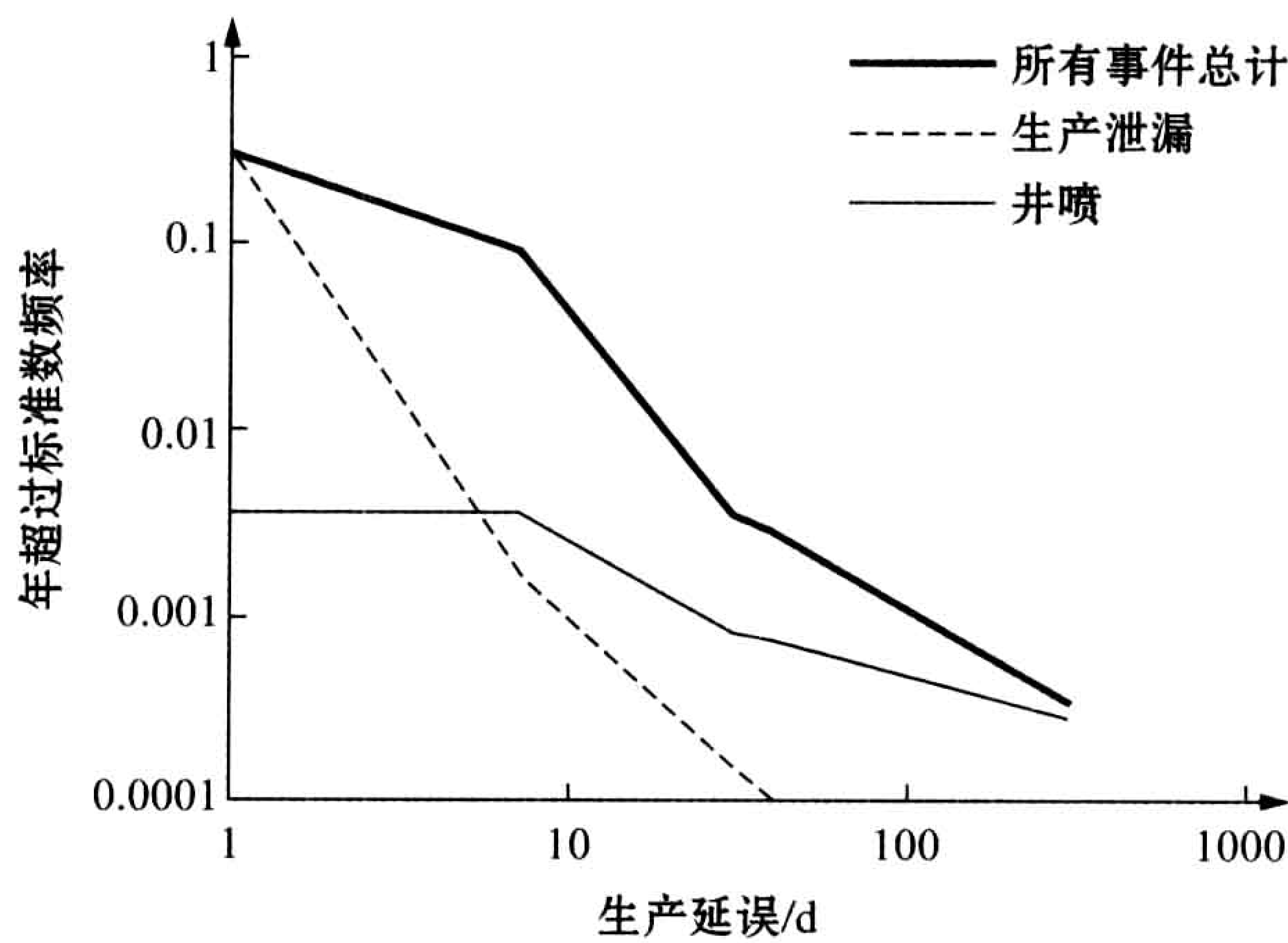


图 2.13　以超标准数方式绘制的生产延误曲线

- 每年生产延误 1.5d；
- 等于生产能力减少 0.40%。

短期事件对生产延误造成 60%影响，但长期事件及罕见事故也会产生重大影响。下面提供一些有益的数据：

- 每年短期延误平均 0.85d(最多一星期)；
- 每年长期损害的概率为 1%，平均延误 66d。

2.3.6　载荷分布功能 Load Distribution Functions

对于死亡事故而言，超标准数图类似于图 2.9 的频数(f-N)图。图 2.14 所示为北海井口平台碰撞的年超标准数图频率，这与图 2.13 呈现的生产延误也是类似的。图中显示了 3 种事故影响的 4 条频率曲线，针对商船、穿梭油船、供应船以及所有船舶。

也许有人会认为载荷分布功能并不是风险呈现，但载荷分布功能可呈现用于进一步风险计算的中间结果。有时这些载荷同设计要求或特点是相对应的，所以有些人对于把这些结果作为风险输出比较感兴趣。比如对于碰撞载荷就

是这种情况。这些曲线可用于预防碰撞载荷的结构设计输入。

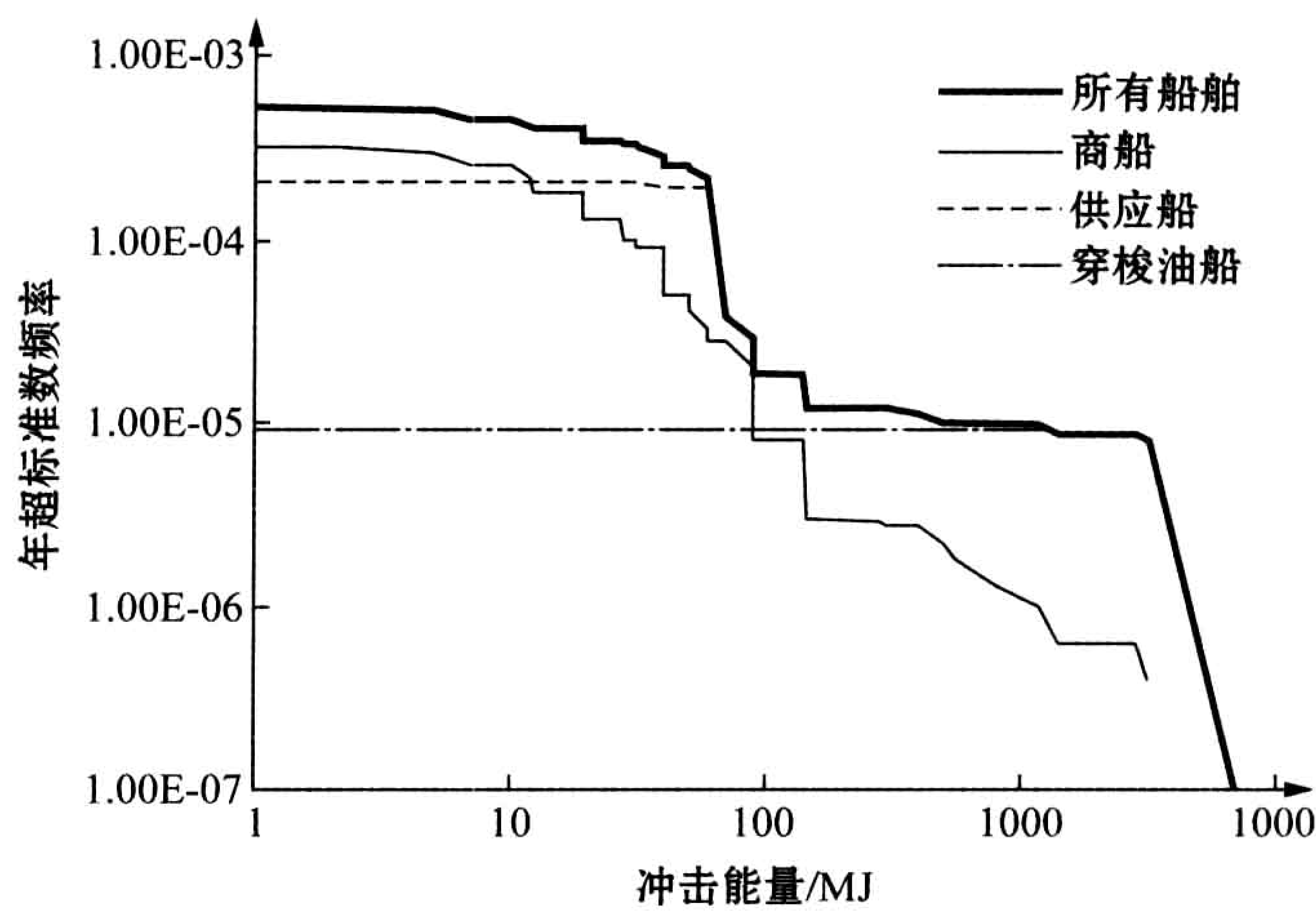


图 2.14　用于碰撞风险的典型超标准数频率

2.4　不确定性 Uncertainties

2.4.1　不确定性思考的基础 Basis for Uncertainty Consideration

风险量化的特点通常是融合了传统统计学方法和贝叶斯(主观)方法。大部分专业人员接受了前一种方法的培养,认为结束事件的概率作为研究对象的定量特征,是与分析师无关的。概率的传统观念意味着风险分析的结果是对这些"真实"概率的计算(估计)。

也可以选择贝叶斯方法,用概率来表达分析师对不确定性或可信程度的度量。风险分析师对于其分析结果不是"客观"的风险结果,而是主观数值的观点仍然存在强烈的抵触。但大多数风险分析师承认其工作的一些要素是主观的。

如经主观评估的条件概率常用于事件树的一些需要对复杂物理现象进行简化的节点。

本书采纳的是贝叶斯方法，将风险值视为事故是否会发生的不确定性的表达。这种考虑的含义在于不确定性不应在量化风险评估研究中进行量化，因为风险评估本身也是不确定性的一种表达。

但这并不意味着不确定性这个主题是没有意义的。对分析师而言，为了将重点放在能最小化内在不确定性的结果上，了解分析中什么因素在影响主观性范围是很重要的。因而我们将考虑分析中对主观性范围比较重要的方面和因素，不同之处在于并不试图量化这些不确定性因素。“风险分析的基础”对这些方面进行了更为详尽的论述(Aven，2003)。

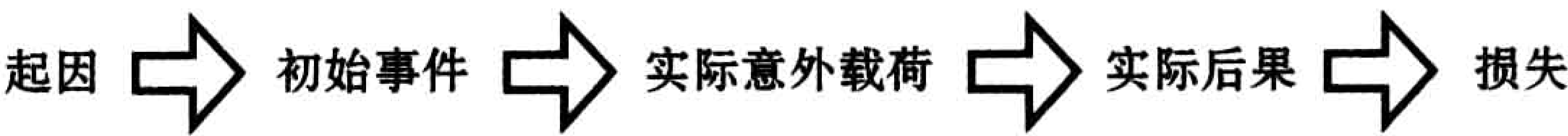
2.4.2 不确定性的影响 Influence of Uncertainty

不确定性永远存在，涉及特定事件是否会发生、直接影响将会是什么，以及对于人员、环境或资产的后果是什么等。这种不确定性反映出对于分析缺乏足够的信息和知识，涉及技术方案、作业、维护理念以及逻辑前提等。随着油田开发项目的进展，不确定性将会减少。但对于意外事件的后果总会存在一些不确定性，甚至在海上设施已经安装并投入运行后。

不确定性通过相应的概率来表达，而且没有其他的表达方式，但对不确定性的来源进行考虑和反映还是很重要的。

一般认为量化风险评估研究中不确定性主要有 3 个来源：第一个来源涉及计算中用到的人数变化，比如是否有大量可用的相关数据；导致不确定性的第二个方面与风险建模的简化程度有关；第三个因素则涉及相关现象和机制知识的完备性。

为了理解不确定性的影响，考虑风险如何进行计算是非常重要的。图 2.15 说明了从初始事件到最终结果对事件序列的计算(对事件序列的深入探讨见第 4章)：



过去在定量风险评估研究中经常忽略事件的起因。比如不会特别说明碳

氢化合物泄漏的起因。第 5.1 节将对此进行详细讨论。涉及事件序列风险计算的例子如下：



当深入事故序列后，必须进行假设的范围通常会扩大，于是就引入了越来越多的不确定性。同物理意外载荷或后果相比，对于涉及死亡事故风险的计算，不确定性的来源更多。在选择用于决策的风险参数时也应该考虑到这一点（见第 5.13 节的论述）。

应在进行评估前明确分析中处理不确定性的方法。本书推荐选择贝叶斯方法，这就意味着对于分析所使用的重要假设和数据，为了说明分析中的不确定性应进行敏感性研究。

挪威石油标准化组织（NORSOK）Z-013 标准说明了应将风险分析的“最佳估算”风险等级用作决策的基础，而不是乐观或悲观的分析结果。这是基于经典统计学的方法，需要进行一些解释。这个要求意味着应使用预期值，而不是可选值。

当分析师认为特定的评估或计算有明显的不确定性时，通常的做法是将重点保守地放在“出错”上。这被认为是好的做法，但注意应确保不要过分保守。如最大爆炸冲击载荷的计算值为 1.2bar，那么就能确定碎片对人员的可能影响（本例中不考虑其他影响）并保守地认为 50％暴露在爆炸中的人员会受到碎片的伤害。在计算人员受伤比例时比较保守是没有问题的，但不应根据这种爆炸而保守地考虑所有影响爆炸冲击载荷频率的因素。

2.4.3　基于经验数据的计算
Calculation Based on Observations

统计学方法可能是比较适合于考虑变化性的，这可以通过以下的例子进行说明。现在要考虑 3 个作业多年的海上设施，表 2.9 是其发生碳氢化合物泄漏的次数（所有泄漏，最小的也包括在内）。

表 2.9　海上设施、工时和碳氢化合物泄漏的经验数据

海上设施	15 年间碳氢化合物泄漏的次数	15 年的工时数/百万
A	100	80
B	65	50
C	25	100

首先对 3 个海上设施分别计算其泄露的平均频率，如表 2.10 所示。与海上设施 B 相比，海上设施 A 每年的平均碳氢化合物泄漏数要高 50%，但两个海上设施的每百万工时泄漏数却非常接近。海上设施 C 的平均频率明显更低。问题可能在于这些区别在统计学上是否显著。

表 2.10　例子：平均泄漏数

海上设施	每年平均泄漏数	每百万工时平均泄漏数
A	6.67	1.25
B	4.33	1.30
C	1.67	0.25

基于假定的泊松分布，现在可以对 3 个海上设施 90% 的预测区间进行计算。这意味着为了断定是否发生了明显改进或增长，可以将预测区间同下一年的泄漏发生情况进行比较。

本书对统计显著性的解释同用于风险评估的传统解释是不同的。90% 预测区间指的是如果风险的所有来源和机制在将来不发生变化，将来的观测值（在这里是泄漏数）将落在预测区间内，给定的概率为 90%。如果将来的观测值落在预测区间之外，就有充分的证据断定条件的变化已经影响到了风险。这称为 90% 置信水平。

应该注意的是这不同于风险评估传统方法中所使用的置信区间，虽然方法看起来是一样的。置信区间的基础是假设“真实”值存在，并由类似情况下样本的属性平均值生成，但在此处并不是我们假设的一部分。

表 2.11　例子：平均泄漏数

海上设施	每年平均泄漏数	预测区间（每年泄漏数）
A	6.67	2～11
B	4.33	0～8
C	1.67	0～5

如果下一年海上设施 A 发生了一次碳氢化合物泄漏，这说明统计学上显著减少了。而另一方面，即使海上设施 B 完全没有发生泄漏，也无充分的数据断定没有显著减少。

如果对海上设施 A 和海上设施 B 的平均值进行计算，就有了更大的数据库，计算显著变化的基础也就更大，如表 2.12 所示。

如果下一年海上设施 A 和海上设施 B 各发生了一次碳氢化合物泄漏，就说明显著减少了。此外，如果海上设施 C 发生了 3 次泄漏并且其工时为 600 万，即对应于每百万工时泄漏数为 0.5，那么同海上设施 A 和海上设施 B 的平均数相比，统计学上显著减少了。

表 2.12　海上设施 A 和海上设施 B 的平均泄漏数

海上设施	每年每海上设施平均泄漏数	预测区间(每年泄漏数)
海上设施 A 和 B 的平均数	5.5	2.5～8.5
每百万工时平均数	1.27	0.58～1.96

现在可以对这 3 个海上设施的预测区间进行比较。可以看出所有 3 个预测区间在一定程度上都有重叠，意味着每百万工时平均泄漏数的差别可能是由于统计学变化所致。表 2.13 考虑了置信水平为 80%的情况。现在海上设施 A 和海上设施 B 的预测区间仍然重叠。而海上设施 C 也仍然同海上设施 A 略微重叠，差别可能是由于统计学变化所致。置信水平为 70%时就不再发生重叠。这意味着海上设施 A 的平均死亡事故率等级高于海上设施 C 的概率为 70%。最后，图 2.15 显示了置信水平为 90%和 80%时设备的预测区间。

表 2.13　海上设施 A、B 和 C 的预测区间，80%置信水平

海上设施	预测区间(80%)	
	下限	上限
A	0.38	1.69
B	0.00	2.10
C	0.00	0.45

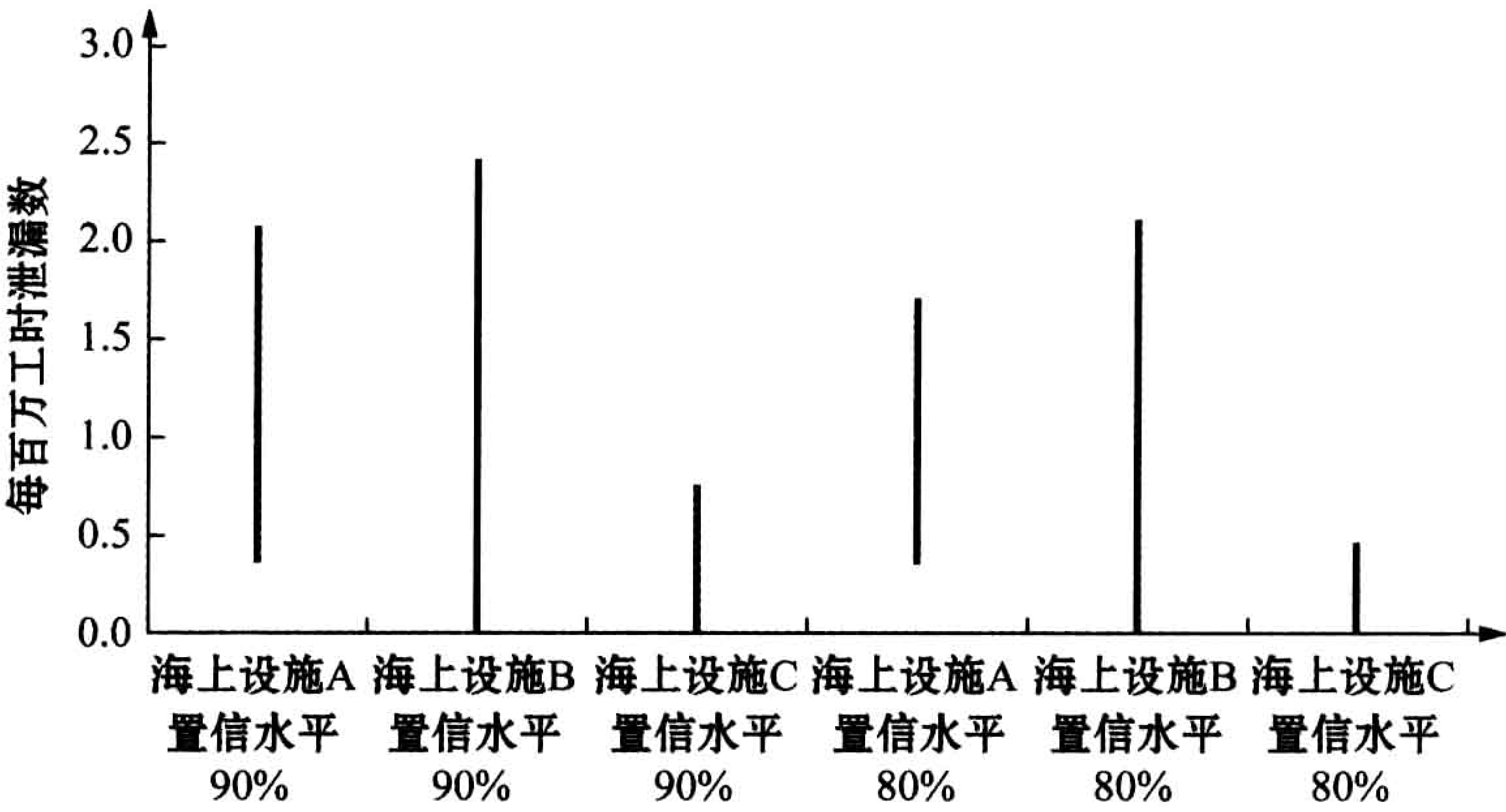


图 2.15　不同置信水平的预测区间比较

2.5　基本的风险建模概念 Basic Risk Modelling Concepts

本章将对一些涉及风险评估和呈现的重要概念进行介绍。危险和风险建模需要了解一些深入的概念，以下将对“深度防护”、“风险屏障”、“根本原因”、“风险影响因素”以及“风险降低措施”进行探讨。更多的概念和术语可见第 660 页的词汇表。

2.5.1　深度防护 Defence in Depth

深度防护一词与复杂行业的事故预防密切相关，过去有几个作者以不同的方式介绍过这个原理。哈顿的事故预防十大策略（Haddon，1980）、调查逻辑树以及管理疏忽与危险树（MORT）都反映了相同的基本原理：

- 在源头包含能量；
- 在源头和目标之间阻止能量；
- 保护目标对抗能量。

詹姆斯·瑞森教授(Reason,1997)将重点放在可能导致类似防护崩溃的组织原因上,如通过 TRIPOD 模型。Kjellén(2000)也对风险模型和原理进行了深入探讨。

如果根据哈顿的策略和管理疏忽与危险树采纳"能量流"的概念,屏障就是用来包含能量、阻止能量流以及保护目标对抗能量的手段。这种解释意味着"屏障"应被视为物理"防护手段",但很多作者和专家也经常会提到"组织屏障"。本书坚持的原则为屏障是可控制(改变)某种形式能量流的行为或功能,这和"屏障功能"是有关联的,见第 2.5.2 节的介绍。

最容易对深度防护进行说明的方法就是从完全缺失这个能力的情形开始。单车道公路(每个方向一条车道)上的家庭汽车没有任何深度防护。如果操作者(司机)失去对汽车的控制,就很容易与其他汽车发生碰撞,导致严重(致命)后果。我们多年来通过对一些区域进行特别设计来制造更好的汽车,这些区域在发生碰撞时能够吸收能量。这意味着需要由司机来保证不失去对能量的控制,而在其他汽车上设计了屏障,用于在发生正面碰撞时保护汽车里的人员。但如果失去对汽车的控制,却没有任何能阻止能量流的屏障。

那么为了提供深度防护能做些什么呢?瑞典开始采用在道路中间设置物理屏障的方法,至少在斯堪的纳维亚,这个方法得到了广泛的应用。车道之间的屏障将可以阻止汽车无法控制的能量,汽车就不会失控进入对面车道,这样我们就有了能有效防止正面碰撞的屏障。理论上还可以安装一些探测装置,在失去控制前设法探测到不希望发生的情况,但是应用得并不普遍。比如司机将要睡着时,如果有探测器能够及时发现,这将极大地提高防护能力。总之所有这些措施最终将导致深度防护能够有效防止正面碰撞事故。

屏障法在涉及火灾和爆炸危险时应用得最为广泛,对于这类危险也很容易说明。以下将对屏障系统和要素进行简要介绍。

2.5.2 风险屏障 Barriers

这个术语由"为了安全合作"工作组提出(OLF,2004b),并在涉及以下层面时使用:

- 屏障功能；
- 屏障系统；
- 屏障要素；
- 屏障影响因素。

这些层面的区别可说明如下：

- 屏障功能：　计划用于预防、控制、或缓解不希望发生事件或事故的功能。
- 屏障系统：　设计并实施执行一个或多个屏障功能的技术、人员和/或组织措施。
- 屏障要素：　屏障系统的一部分，自身不足以执行屏障功能。
- 屏障影响因素：　影响屏障系统性能的条件。

“屏障”一词同样没有准确的定义，但以概括、不精确的方式应用于所有方面。关于屏障主要强调的通常是在生产区域预防泄漏，包括以下屏障功能：

- 设计用于维护生产系统完整性的屏障功能（主要通过将泄漏作为基于事件的指标进行报告来实现）；
- 设计用于预防着火的屏障功能；
- 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能；
- 设计用于预防事态加剧的屏障功能；
- 设计用于预防死亡事故的屏障功能。

屏障功能，如“预防着火”，可划分为气体探测、电气隔离以及设备防爆等子功能。气体探测子功能的一个屏障要素是气体探测器，生产区域操作员可能是要素的另一个例子。如果将生产区域操作员视为屏障要素，就可能有几个屏障影响因素，如工作环境、能力、安全意识和安全文化。不同的屏障由许多相互协调的系统和要素构成。

挪威石油安全管理局规范要求说明以下屏障性能：

- 可靠性/可用性；

- 有效性/能力；
- 健壮性(反义词脆弱性)。

可靠性/可用性是唯一在作业中会发生明显变化的屏障性能，有效性/能力和健壮性主要在工程和设计过程中受到影响。但另一方面，可能发生长期缓慢退化并改变其值。

以下方面会影响技术屏障系统的可靠性和可用性：

- 预防和改进维护；
- 检查和测试计划；
- 管理和行政方面。

图 2.16 是一个简单的方块图，通过因失去对碳氢化合物的控制而导致的火灾和/或爆炸来简要说明涉及预防死亡事故的主要屏障功能。



图 2.16　用于碳氢化合物泄漏的屏障功能

所列出的生产区域碳氢化合物泄漏屏障功能同样也适用于立管和管线的井喷和泄漏。对于井喷危险，完整的屏障是油井控制屏障。油井控制屏障不在本章的讨论范围之内。

用于海上事故和结构事故的屏障要少一些。对应的屏障功能为：

- 设计用于维护结构完整性和海上控制的屏障功能；
- 设计用于预防初始失效加剧的屏障功能；
- 设计用于预防全部损失的屏障功能；
- 设计用于预防死亡事故的屏障功能。

对于在串列卸载过程中失去位置保持功能的动力定位穿梭油船(深入讨论见第 11.4 节)，图 2.17 说明预防因穿梭油船和浮式生产储卸装置之间碰撞而导致死亡事故的主要屏障功能。

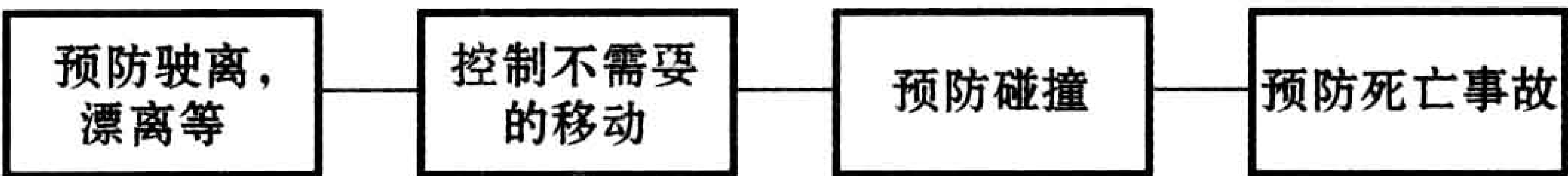


图 2.17　用于因动力定位系统失效而导致穿梭油船位置保持功能失效的屏障功能

图 2.18 说明了屏障功能、屏障要素、屏障要素失效以及风险影响因素之间的关系。其功能是检测处于错误位置的一个阀，为此需要几个屏障系统或要素。可能会发生失效，如故障树中的两个基本失效事件所示。图中风险影响因素显示为屏障要素失效的影响因素。图 2.18 来自屏障与营运风险分析方法，见第 6.2.6.1 节。

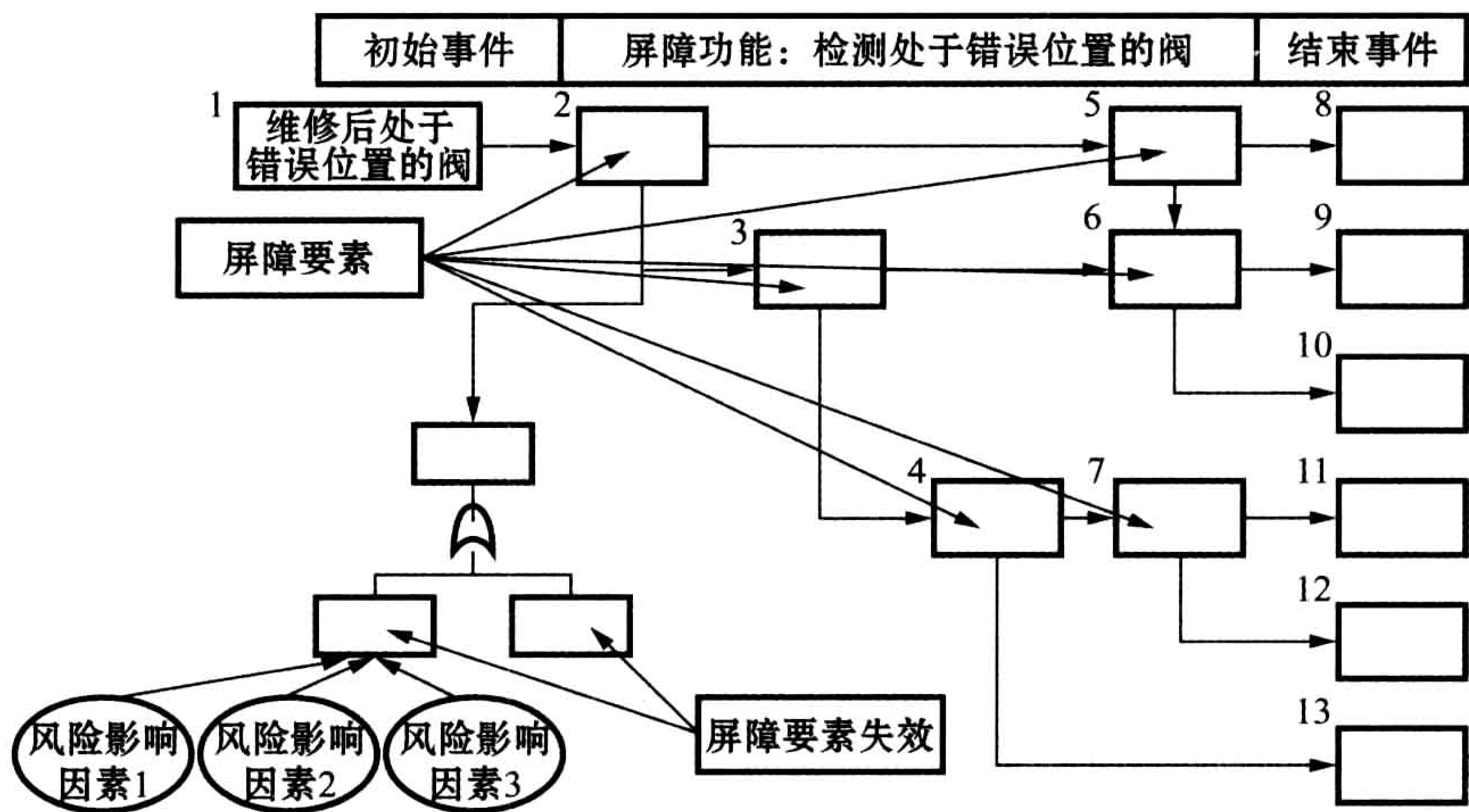


图 2.18　屏障功能、屏障要素以及风险影响因素之间的关系

2.5.3　根本原因 Root Causes

根据 TapRoot® 系统，根本原因是指为了修理，以及修理后能预防或明显降低问题再次发生可能性的最基本原因，这些最基本原因能够合理确定并且在管理上是可以控制的(Paradies and Unger，2000)。

根本原因是事故和意外调查最关键的因素，因为它们对预防和降低问题再次发生可能性非常重要。但据称确定根本原因却经常是行业进行内部调查的

一个薄弱因素。

“直接原因”通常是内部调查的重点，如下面对北海一个海上设施气体泄漏的调查说明：

- 直接原因：生产人员对手控隔离阀的错误操作；
- 潜在原因：手册没有对“最正确”实际操作进行说明；
  没有对阀做标记；
  工作态度发生变化，日常工作没有使用指令。

这些（调查小组认为的）潜在原因是根本原因吗？不是，不能认为这些是根本原因，因为不是管理能够控制的最基本原因。根本原因可能是“时间压力太大”、“管理默认不符合程序是可以接受的”，或者只是“安全文化很差”。

2.5.4 风险影响因素 Risk Influencing Factors

风险影响因素（有时称为屏障性能影响因素）指影响屏障系统和要素性能的影响因素。作为例子，考虑在碳氢化合物处理区需要通过人工检查完成的人工气体检测功能。对工作人员检测可能发生气体泄漏的能力产生影响的因素如下：

- 人工检查的程序；
- 工作及工作模式的组织；
- 设备操作员的培训；
- 设备操作员的经验；
- 设备操作员的激励因素；
- 等等。

根据已使用的一些定义，这里所考虑的影响因素常常被认为是“屏障”。

“导致因素”和“影响因素”是否是同义表达可能还需要讨论，从一定程度上讲它们是同义的。也有人认为“影响因素”要比“导致因素”范围更大，但没有引起什么关注。导致因素和影响因素都为确定风险降低措施提供了良机，这可能会对风险等级产生很重要的影响。

第3章　风险呈现和风险接受准则

Risk Presentation and Risk Acceptance Criteria

挪威离岸业使用风险接受准则的传统可谓悠久。但目前,关于是否应该继续使用风险接受准则仍有争论。作者实际上支持一种替代方法,用生成的替代标准和符合最低合理可行原则(ALARP)的评估取代更为机械的风险接受准则。Aven and Vinnem(2007)对此进行了深入的探讨。

但历史是不能忽略的,风险接受准则已经得到了应用并将继续应用下去。本章首先将介绍风险接受准则制定的背景,很大程度上是源自目前的风险级别。然后将背景介绍作为合适的起点,以北海的数据为例,对目前的风险级别展开论述。

3.1　北海风险全解
Risk Picture, North Sea

Vinnem and Vinnem(1998)对挪威大陆架(NCS)的风险级别进行了详尽的研究。研究主要关注挪威离岸业在北海发生的事故,涵盖人员、环境以及资产风险。以下将概述对人员风险的研究成果,范围只限于死亡风险,并用现有的最新数据进行了更新。

3.1.1　死亡事故概述
Overview of Fatal Accidents

自 1966 年开始油气作业以来,挪威离岸作业发生过 81 起死亡事故,造成 266 人死亡。其中不包括穿梭油船(用于向岸上运输)的死亡事故,但包括母船和其他特种船以及从事相关油气活动的驳船上发生的死亡事故,并忽略了在地球物理测量船上发生的一起死亡事故。图 3.1 是对统计数据的简要概述。

应该注意的是图 3.1 没有对事故数和活动级别进行关联。本节稍后将完成这项工作。频率通过 4 个 10 年时间段来呈现,每个时间段涵盖以下信息:

- 职业事故造成的年平均死亡数(包括潜水作业事故);
- 重大事故造成的年平均死亡数(包括直升机事故)。

其中第二个时间段受到1980年“亚历山大·基尔兰德”钻井平台倾覆事故的很大影响。如果包括这次事故,年平均死亡数为17.4,而不包括的话就只有5.4(见图3.1中的差别)。

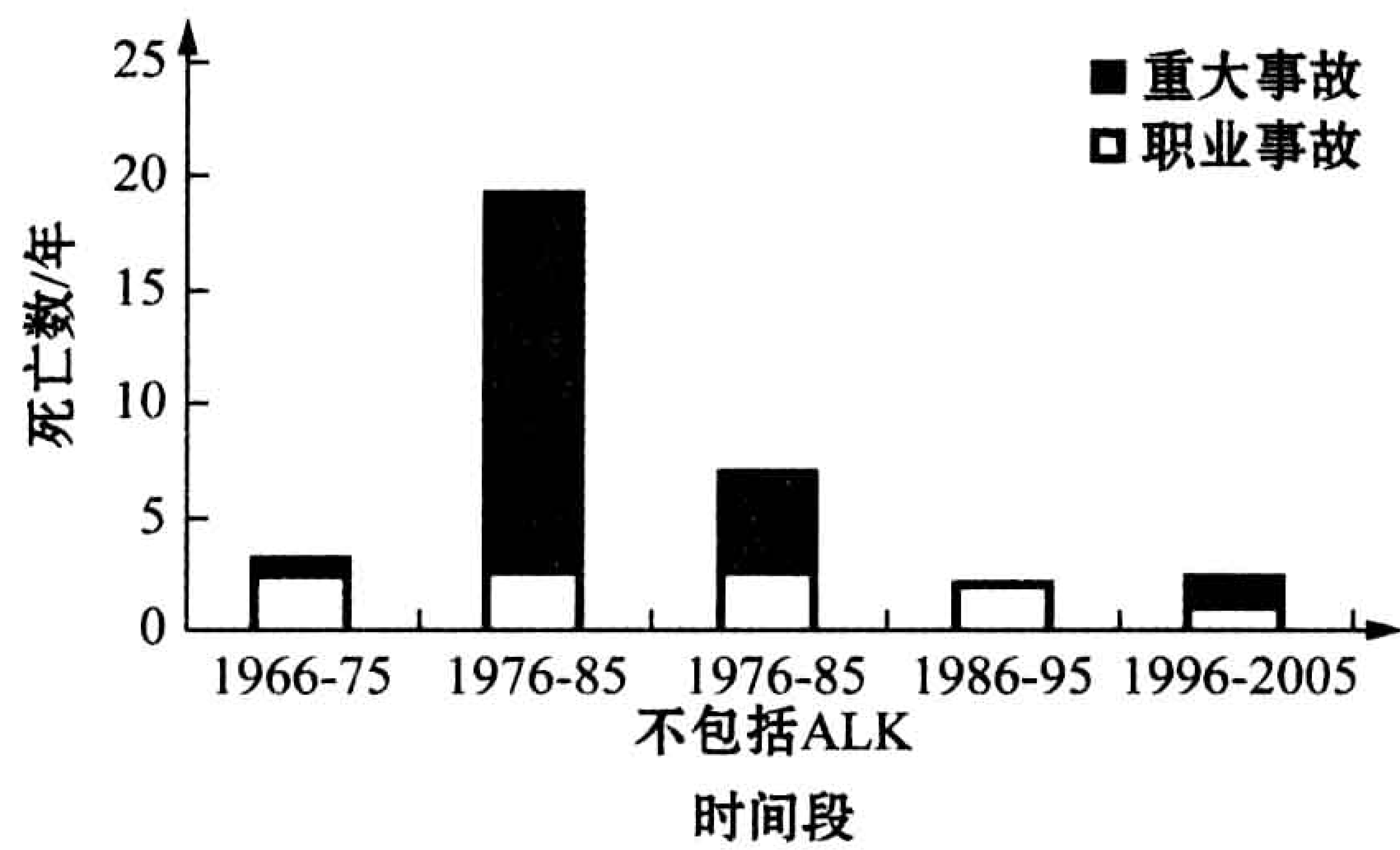


图3.1 挪威大陆架死亡事故概览(ALK=“亚历山大·基尔兰德”钻井平台倾覆事故)

从稍微有些简略的每10年平均死亡数可以看出,总体频率在过去20年里非常稳定。这可以通过以下挪威大陆架发生的重大事故数(包括直升机事故)进一步得到说明,见图3.2。

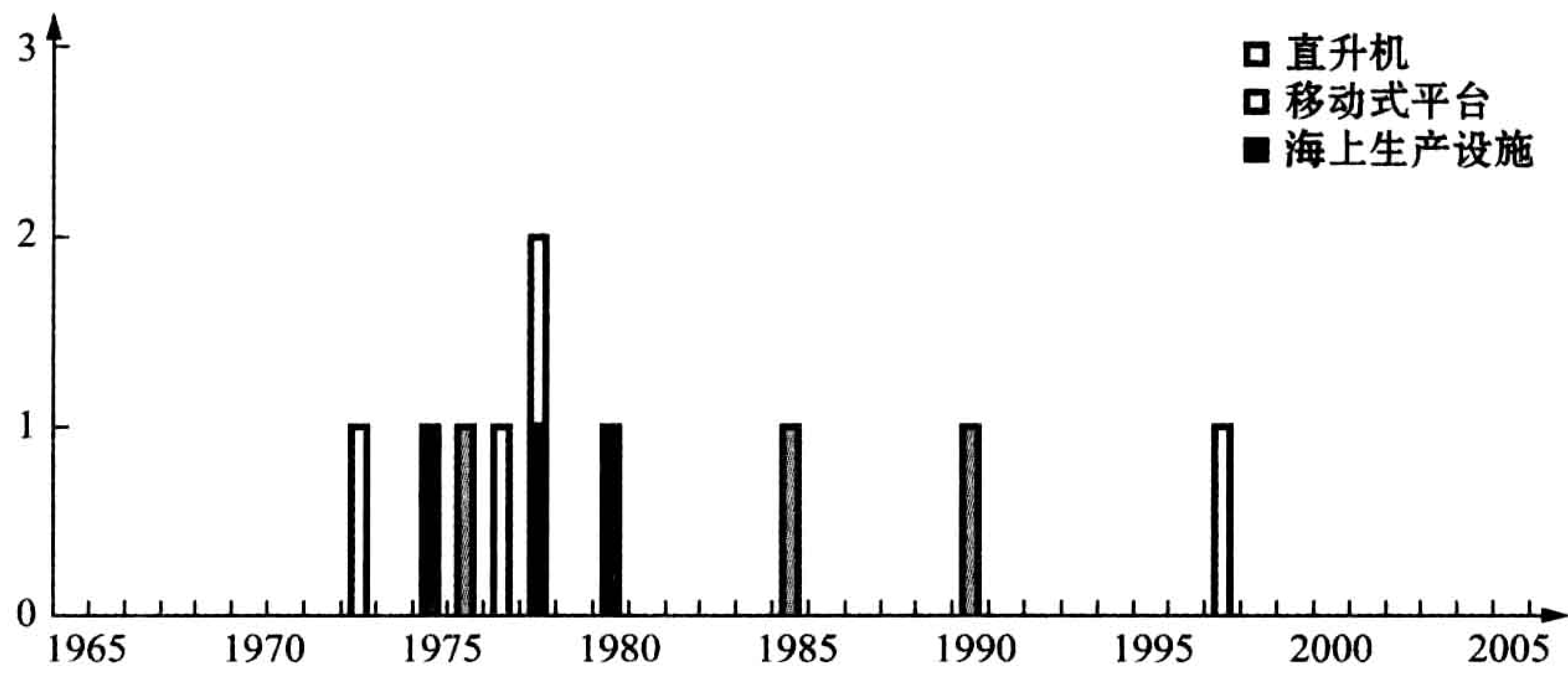


图3.2 挪威离岸作业重大事故发生数

- 1966～1975:2起重大事故;
- 1976～1985:6起重大事故;
- 1986～1995:1起重大事故;
- 1996～2005:1起重大事故。

对于 1966～1986 年(原文为 1965——译者注)时间段是否是职业事故和重大事故频率更高的时间段仍有争议,因而针对 1986～2005 时间段,也就是过去的 20 年进行更深入的探讨比较合适。

3.1.2　人员事故概述 Overview of Accidents to Personnel

1986～2005 期间的死亡事故总数为 28 起,造成 43 人死亡。这些挪威大陆架死亡事故发生在下列不同类型的平台和船舶上:

- 海上生产设施:　8 起死亡事故　9 人死亡;
- 移动式海上设施:　6 起死亡事故　6 人死亡;
- 母船:　9 起死亡事故　10 人死亡;
- 起重船和铺管船:　2 起死亡事故　2 人死亡;
- 潜水作业:　1 起死亡事故　1 人死亡;
- 直升机事故(维修):　1 起死亡事故　3 人死亡;
- 直升机运送(往岸上):　1 起死亡事故　12 人死亡。

考虑的数值不包括发生在沿岸或岸上的事故,虽然在少数情况下类似事故也可能发生在离岸的地方。比如在一起事故中,救生船从 20m 高处落入海中,使船上两人死亡。这种事故也可能发生在离岸情况下(此类事故实际上已经发生过几次)。

20 年里平均死亡事故数为每年 1.4 起,死亡 2.2 人(如果不包括直升机事故的话为每年死亡 1.6 人)。值得进一步关注的是除了直升机事故,这个时期的其他重大事故都没有导致人员死亡。1990 年自升式钻井平台“西伽马”在拖航时倾覆,但所有人员都在海上得到了救援。1991 年的一起事故涉及维修固定式海上设施火炬头的直升机。直升机尾部螺旋桨碰上了火炬导致直升机坠落,3 名乘员死亡。这起事故被划分为职业事故。图 3.3 所示为随时间变化人员死亡数的分布情况。

如果只考虑职业事故,同 1997 年后发生的事故相比,很明显 1997 年前的事故更多。但并没有充分的数据可以断定统计学上有显著的减少。图 3.4 概

览了 1986～2005 年期间挪威大陆架死亡事故的主要起因。

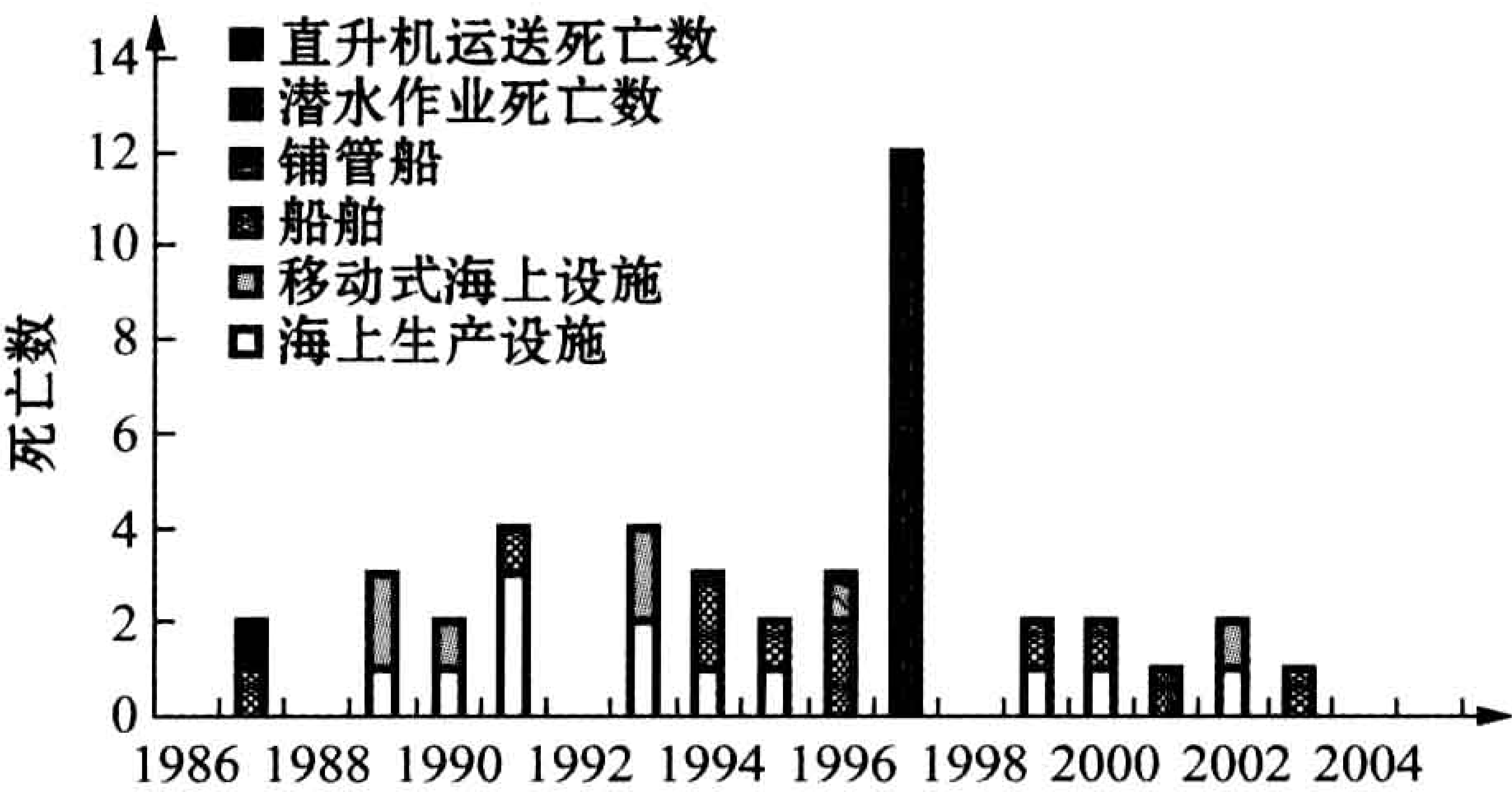


图 3.3 1986～2005 期间挪威大陆架的人员死亡数

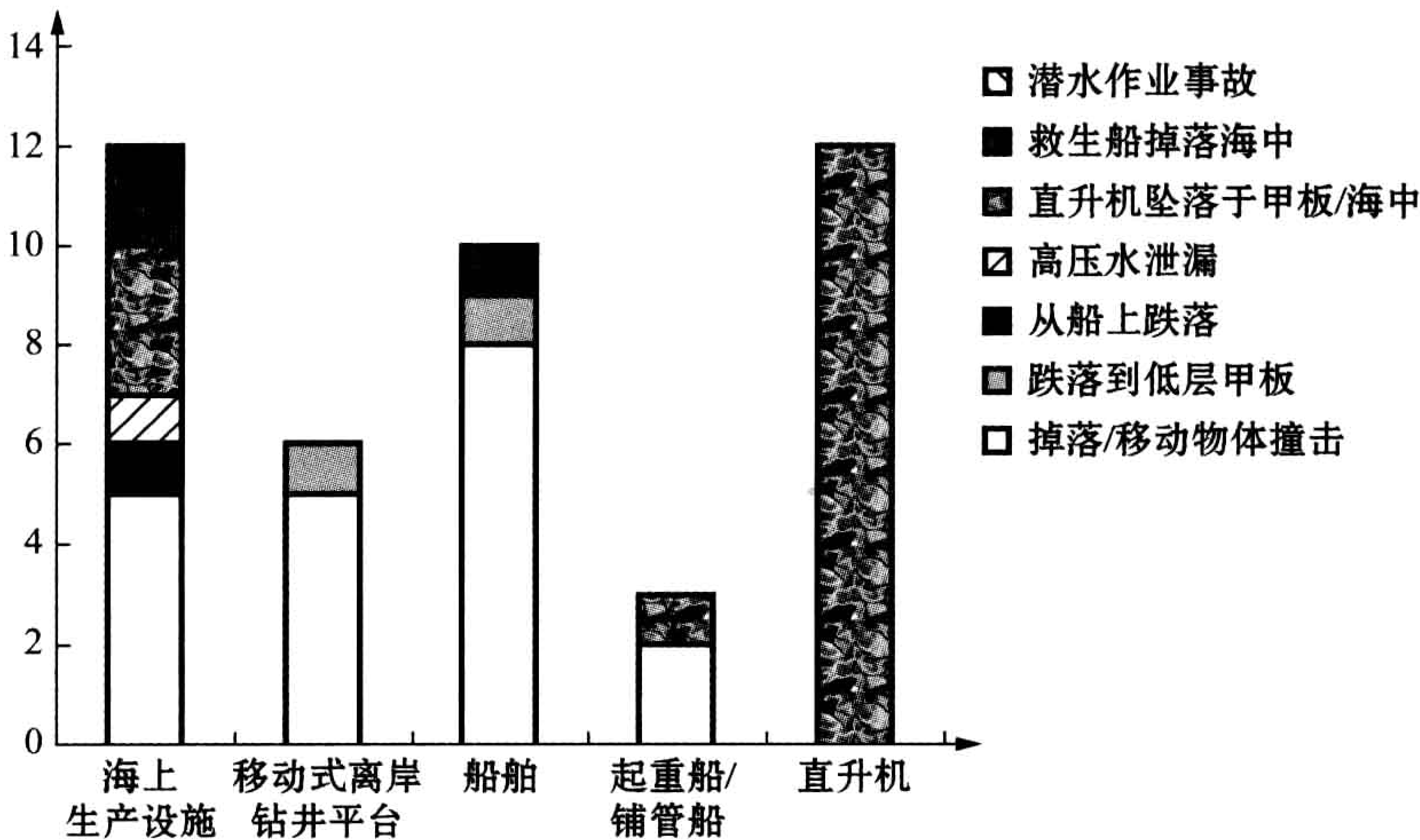


图 3.4 1986～2005 期间挪威大陆架死亡事故的起因

很清楚到目前为止，死亡事故的最重要起因是人员受到移动或掉落物体的撞击或挤压，在此期间单是这种起因就总共造成了 20 人死亡。另外一个主要原因是直升机坠落，一次发生在海上，另一次发生在维修时，如上文所述。人员跌落到低层甲板或海中造成 6 人死亡，后者包括了救生船维修事故，因为预防机制失效，一艘常规救生船在进行维修时失控从正常高度掉入水中。

可以注意到这段时间没有涉及碳氢化合物泄漏的死亡事故。最后一次涉及碳氢化合物泄漏的死亡事故是 1985 年，当时发生的浅层气井喷着火导致一人死亡。

但北海英国离岸业的情况却大相径庭，因 1988 年“帕玻尔·阿尔法”平台事故导致了 167 人死亡。

3.1.3　死亡事故率 Fatal Accident Rates

本节介绍历史上职业事故的死亡事故率等级（不包括直升机事故和潜水作业事故），为所有人员的平均数。这些死亡事故率只基于工时，比如离岸 24 小时中的 12 小时工作时间，其值为过去 10 年（1996～2005）的平均数。死亡事故率等级的估计值见表 3.1。

应指出的是有一起事故不包括在固定式海上设施事故中，当时在更换火炬头时发生一起直升机事故，导致 3 人死亡。这段时间没有发生潜水作业事故，因而上述任何值中都不包括潜水作业。

表 3.1　死亡事故率概览，1996～2005 每工时平均值

活　动	死亡事故率值
固定式海上设施	1.26
移动式钻井平台	1.52
母船	17.6
起重船和铺管船	20.3
所有总计（包括直升机事故）	11.7
所有总计（不包括直升机事故）	8.2

1997 年的直升机事故被限定为职业事故，因为未曾发生造成人员死亡的重大事故。因而真正的风险全解就需要考虑估计风险等级的其他方法。

3.1.4　死亡事故率趋势 Trends in Fatality Rates

从历史死亡事故等级确定可能的趋势是很重要的，这样可以找出需要改善的区域或作业。趋势基于海上设施和船舶上所进行的活动，因而就要排除“亚历山大·基尔兰德”钻井平台事故及其他重大危险事故造成的人员死亡情况。本文分别针对海上生产设施、移动式钻井平台以及母船确定了相应的死亡事故率趋势。

在死亡数和估计工时的基础上计算出死亡事故率值(生产设备的数据可从挪威石油安全管理局获取,其他活动的数据主要来自活动水平)。

海上生产设施和移动式海上设施的死亡事故率值从第一纵轴读取,40 年间降低了大约 250。如图 3.5 所示,母船的死亡事故率值从第二纵轴(右边的纵轴)读取,开始时死亡事故率值约为 750。死亡事故率值在 1985 年前下降迅速,此后其等级非常稳定。

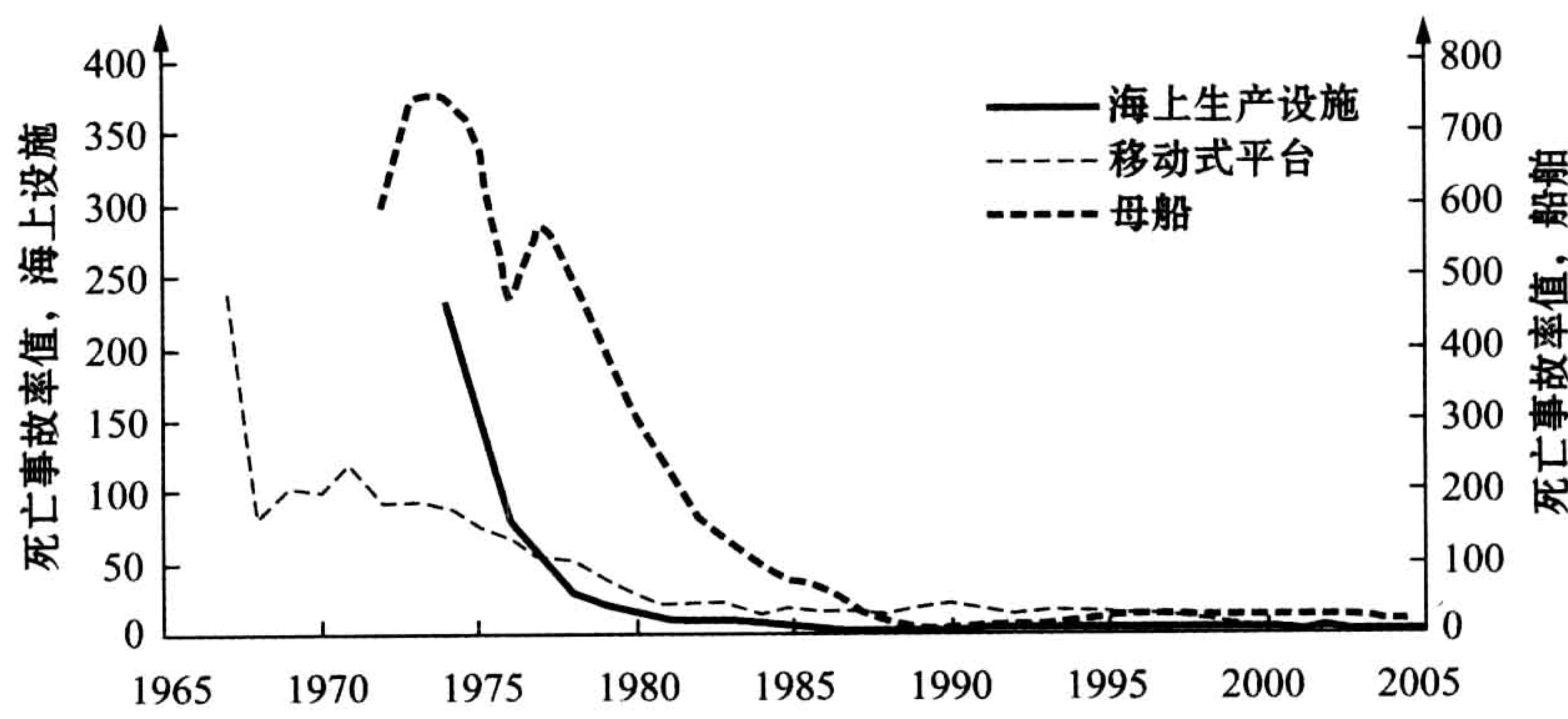


图 3.5 所有海上设施和母船职业事故平均死亡事故率值的长期趋势

图 3.6 详细显示了这一阶段的后半段时间,也就是后 20 年的趋势。数值包括了北海挪威离岸业发生的所有死亡事故,并计算为 10 年滚动平均值。

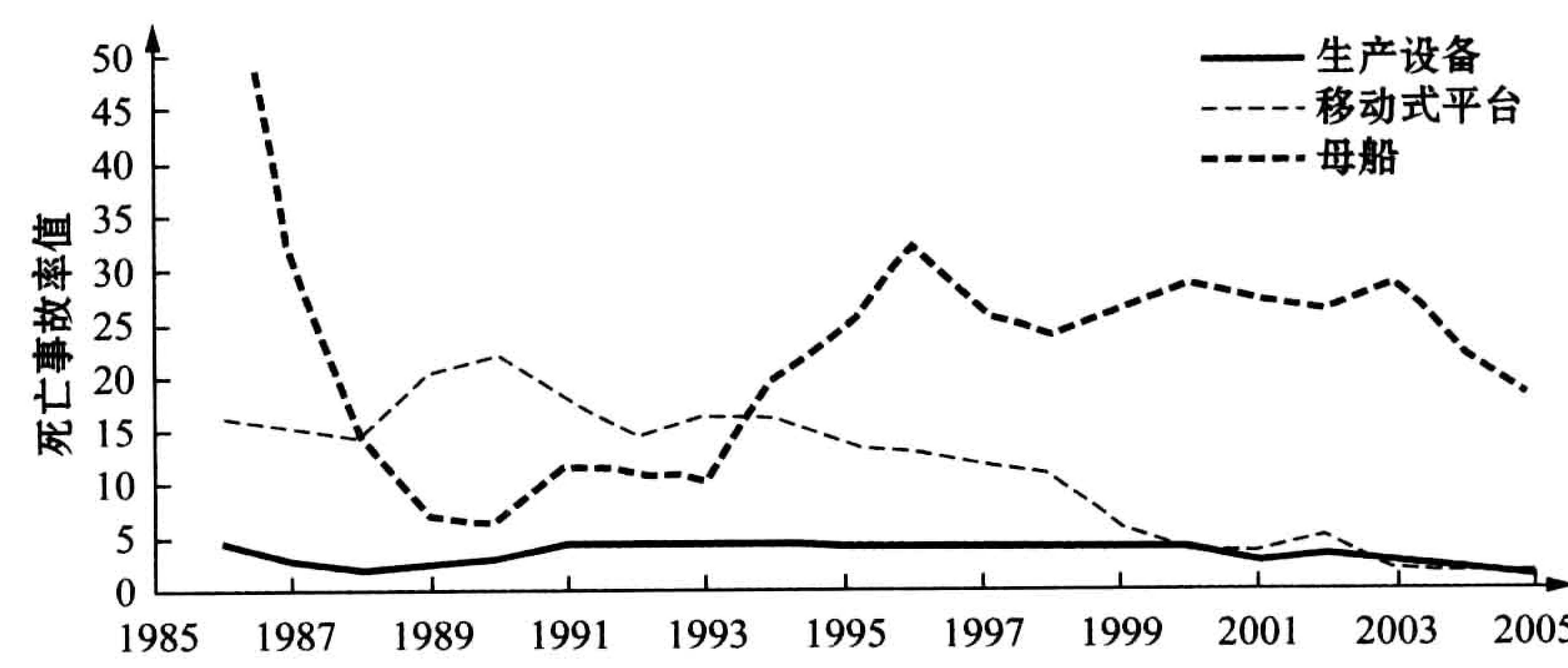


图 3.6 海上生产设施、移动式平台和母船的平均死亡事故率趋势

在整个时间段内海上生产设施的趋势是向下的,虽然也可以认为 2000 年

以前的水平比较平稳。2000 年以后事故频率降低，2003 年、2004 年、2005 年以及 1996～1998 年没有发生死亡事故。

对于移动式钻井平台，在整个时间段内的总体趋势是下降的。2000 年以后海上生产设施和移动式平台之间只有很小差别或没有差别，这在以前从来没有出现过。

事实上母船的变化最大，但要注意的是这些船工时较少，多发生一起死亡事故也会产生较大的影响。母船还是 20 年里死亡数最高的，见第 3.1.3 节。20 世纪 80 年代后期死亡数迅速降低，然后又上升了十几年，2000 年以后再次下降。

应注意的是母船船东同北海挪威石油公司于 1998 年和 1999 年开展了合作以提高母船的安全性。

2004 年、2005 年和 2006 年没有发生一起死亡事故，这还是第一次连续 3 年没有发生死亡事故。有几个这样的明显信号可以说明 2000 年以来情况得到了改善。

这些趋势对于将来死亡事故的发生有什么含义呢？我们并不知道，但我们希望事故更少。这也将取决于所有相关方采取的行动。要注意的是对时间段最后一年计算的值实际上是前 10 年的平均值，因为采用的是滚动平均计算。使用这个平均值可能太乐观了，因为上升的趋势很明显。当趋势接近于稳定不变时，假设可能才更为合理。

这些曲线的数值将在第 3.1.7 节用于潜在风险的预测，所以使用哪些值就很重要。本书基于所显示的曲线进行选择，并依据过去 10 年生产设备和移动式钻井平台的平均值假设将来的趋势稳定不变。因为母船的趋势增长迅速，使用过去 5 年而不是 10 年的平均值更为现实。这等同于每亿工时的死亡事故率值为 39.4，要明显超过图中显示的值。

3.1.5　直升机运输的风险等级
Risk Level for Helicopter Transport

直升机风险需要单独考虑，因为几乎涉及离岸油气活动的所有人员，而且风险等级相对也比较高。1977～1980 年间，挪威离岸作业中发生了几起严重的直升机死亡事故，而英国直升机作业死亡事故高发期为 1981～1986。1986 年以后直升机死亡事故明显减少。在英国离岸作业发生多起直升机死亡事故后立即进行了直升机安全研究（HSS1，SINTEF，1990），并估计死亡事故率高达：

$3.8 \cdot 10^{-6}$每人员飞行小时

1998年进行的研究(Vinnem and Vinnem,1998)针对直升机飞行和降落/起飞将事故频率进行了单独划分。参照值为:

$1.6 \cdot 10^{-6}$每人员飞行小时

直升机安全研究于1999年进行了更新(HSS2,SINTEF,1999),2002年编撰的直升机安全白皮书(NOU,2002)也使用了挪威科技工业研究院的最新统计数据。研究证实了以下数值:

$1.4 \cdot 10^{-6}$每人员飞行小时

白皮书还提出了降低风险等级的目标:10年内比1990～2000平均等级降低50%。

过去的工作及将来的目标对于降低死亡事故率非常重要,但有几个因素需要考虑:

- 挪威科技工业研究院最初的研究(HSS1)涵盖了1969～1989年时间段,1975～1986年期间超过125人在北海直升机事故中死亡,而1986年以后只发生两起死亡事故,造成23人死亡;
- 直升机安全研究考虑了1975～1986年时间段,但研究并没有尝试去确定任何趋势或是否存在造成挪威和英国作业差别的基本因素;
- 由于事故高发,因而期望能够降低事故频率,所以20世纪80年代直升机作业得到了改善是不争的事实。

挪威科技工业研究院(SINTEF)研究的一个不足之处是没有区分直升机飞行及降落/起飞的死亡事故风险。当考虑来回运送人员时这是一个很重要的区别。

对死亡事故高发时间段之后的10年进行分析是否会导致产生过于乐观的估计还有争议。但为避免这种情况需要涵盖多少更早的时间段也是无法确定的。还需要指出的是,(1997年)北海挪威离岸业发生的一起严重直升机事故包含在建立历史风险等级的时间段之内。

为确定最适合于直升机运输的人员风险等级,统计分析进行了更新。重点主要放在最后10年,即1996～2005年。表3.2和表3.3是分析的数据基础。应注意的是最后10年的所有事故都发生在飞行中,降落/起飞过程中没有事

故，但也发生过一些侥幸脱险的情况。

表 3.2　英国和挪威离岸作业的直升机统计数据（1996～2005 年）

区域	人员飞行小时/百万 h	来　源
挪威	7 090	NOU2002:17 和 2005 年风险等级项目报告
英国	10 320	NOU2002:17 延续到 2005 年 相应的飞行 h 数：
总计	17 410	1.348 百万 h

表 3.3　英国和挪威离岸作业的直升机事故统计数据（1996～2005 年）

内　容	人员数	来　源
飞行事故	3	)：
起飞/降落事故	0	)：
死亡事故	2	)：NOU2002:17 和 HSE 2004
死亡数	23	)：
幸存数	0	)：

这样最新北海直升机运输的死亡事故率值就为：

$$1.32 \cdot 10^{-6} \text{每人员飞行小时}$$

这同直升机安全白皮书（NOU，2002）所述的 1.4 每百万人员飞行小时的值相比几乎没有变化。如果对 1987～2005 年间进行计算，其对应值为 1.35 每百万人员飞行小时。图 3.7 通过 10 年滚动平均值说明了最后 10 年的趋势。

可以发现值在此期间的变化有限。直升机安全白皮书（NOU）计算的是 10 年滚动平均值，当然变化要更大一些。如果对最后 20 年，也就是 1986～2005 年间进行观察，可以发现发生过以下直升机死亡事故：

- 1986 年：飞行过程中发生 1 起死亡事故，45 人死亡，英国（支努干直升机）；
- 1990 年：离岸降落过程中发生 1 起死亡事故，6 人死亡，英国；
- 1992 年：向浮式住宿船短途运送过程中发生 1 起死亡事故，11 人死亡（1 人幸存），英国；
- 1997 年：飞行过程中发生 1 起死亡事故，12 人死亡，挪威；
- 2002 年：接近平台过程中发生 1 起死亡事故，11 人死亡，英国。

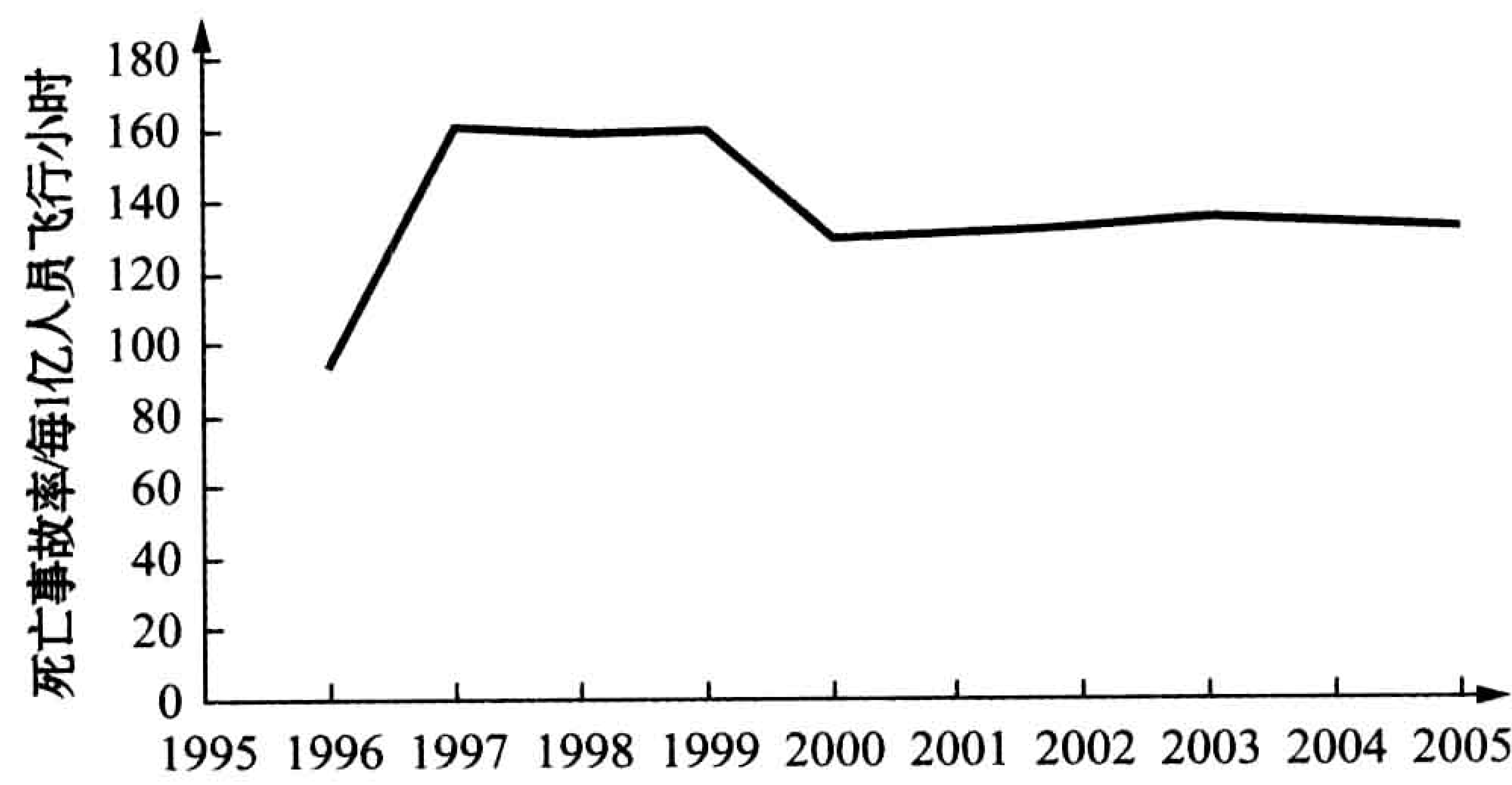


图 3.7 直升机飞行的 10 年滚动平均死亡事故率值，1996～2005 年

应该说明的是为了避免开含 1986 年支努干直升机发生的事故，特意选择了 1987～2005 年时间段。这种型号的直升机在那次事故后不久就退出了北海离岸作业，因而对于现在的作业而言没有代表性。表 3.4 分别计算出了直升机在飞行时以及在海上设施上降落时的死亡事故率。

表 3.4 飞行和降落阶段的直升机风险参数

因 素	飞行	平台上	说 明
基本时间段	1996～2005	1987～2005	
事故率	$2.22 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	
死亡人数占所有面临风险人员数的比例	1.0	0.46	
死亡事故率	$1.48 \cdot 10^{-6}$	$2.01 \cdot 10^{-7}$	
平均死亡数	11.3	6.0	两个数据都基于 1987～2005 年时间段

3.1.6 离岸与岸上活动比较 Comparison Offshore—Onshore Activity

本节对平均离岸死亡事故风险等级和最适合进行对比的岸上活动，也就是炼油厂的风险等级进行了简短比较。比较基于 Vinnem and Vinnem(1998)的 10 年真实职业风险数据。因为将钻井平台和母船同炼油厂进行比较并不合适，所有只使用了海上生产设施的数据。

所有的估计都基于实际工时，即在离岸每天 12h、岸上每天 7.5h 的基础上

进行计算。离岸和岸上人员每人每年的总工时应该是一样的。

1988～1997 期间事故导致炼油厂死 2 人，伤 619 人，离岸生产设备死 6 人，伤 5 855 人。应注意的是 10 年里炼油厂和海上生产设施的总工时数差别很大，分别是 32.2 和 215.5 百万 h。还应说明的是有关当局估计岸上活动的受伤事故实际上只有大约 1/3 得到上报，而离岸作业未上报的受伤事故非常少。这是图 3.8 中没有对受伤频率进行比较的原因。从 2006 年起，(挪威石油安全管理局的)风险等级项目包含了炼油厂和岸上输油管终点，这将逐渐为统计学比较提供更好的可能性。

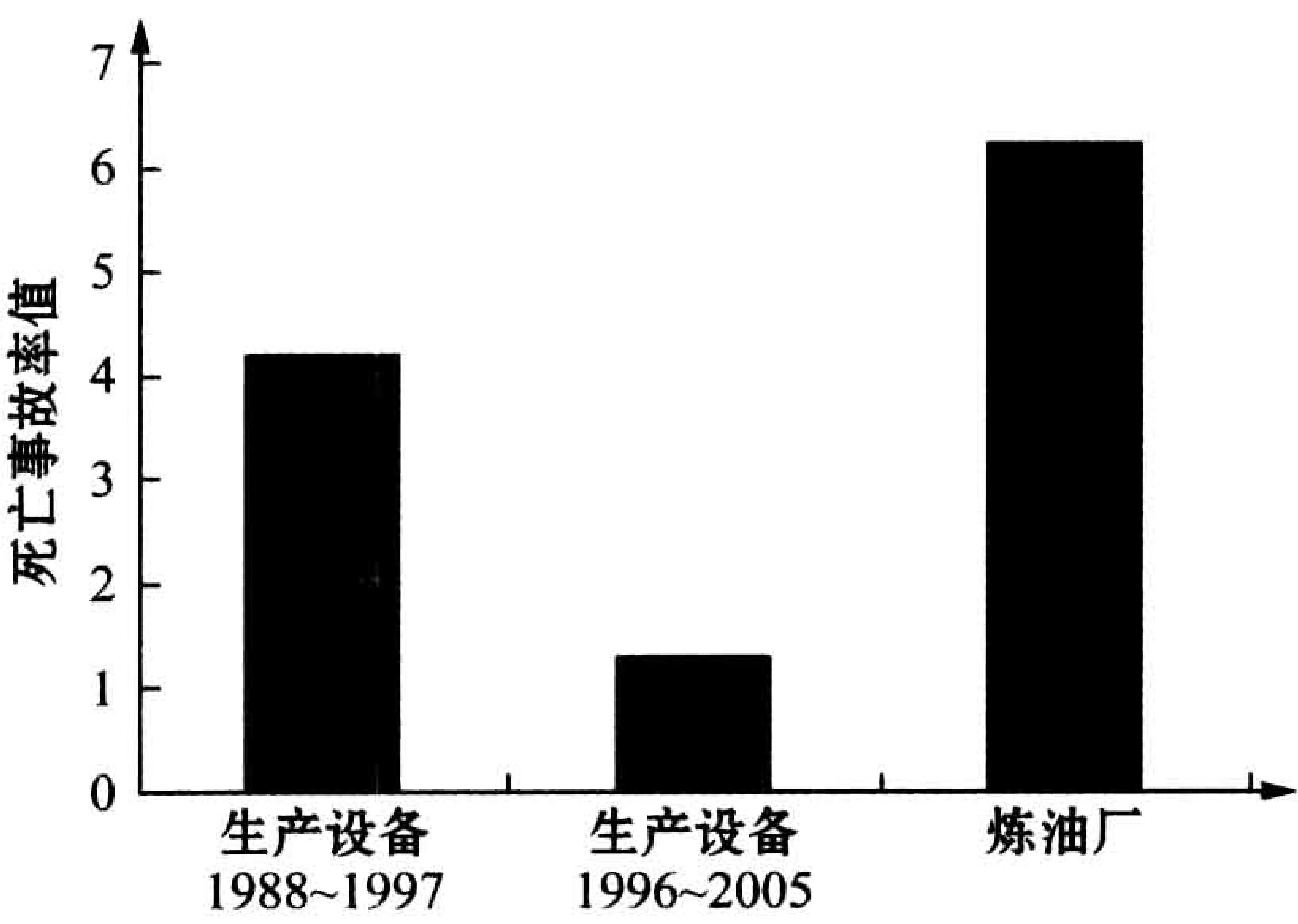


图 3.8　海上生产设施和岸上炼油厂职业风险等级的比较

图 3.8 显示根据不同时间段的离岸死亡事故率值，炼油厂的平均死亡事故率值要比海上生产设施的平均死亡事故率值高 1.5 或 4.9。图中的差别是明显的，但由于死亡事故数比较少(很幸运)，统计学上并不显著。

就职业危险而言，海上生产设施和炼油厂据认为是非常相似的。如果有什么区别的话，那就是海上设施上的工人更易面临跌落的危险，因为通常炼油厂在地面上延伸范围更大，而海上设施的模块则相互堆叠或堆叠在几层甲板上。所以结论就倾向于认为在类似行业中，离岸安全管理比岸上安全管理要有效得多。

3.1.7　潜在风险
Risk Potential

挪威离岸风险的特点是自从“亚历山大·基尔兰德”浮式住宿船倾覆后，没

有发生涉及海上生产设施的重大事故(实际上也可以认为这次事故与移动式平台有关,而不是海上生产设施。但在规范术语中,只要长期是生产作业的一部分,就可以视为“海上生产设施”)。因为没有包含非常罕见但又是非常严重事故所造成的影响,所以上述风险等级并不足以预测可能会发生的平均死亡事故数。挪威风险等级报告(Vinnem and Vinnem,1998)除了考虑职业事故导致的死亡事故外,作为说明潜在风险的一种方法,还考虑了将来重大危险的影响。

图 3.9 对海上生产设施、移动式钻井平台以及母船上人员将来的死亡事故风险等级进行了估算。这些估算是基于 1988～1997 时间段的平均死亡事故率值(Vinnem and Vinnem,1998)。职业和运输风险因素基于以前的水平,而重大事故风险则在一般概念失效频率的基础上进行估算。

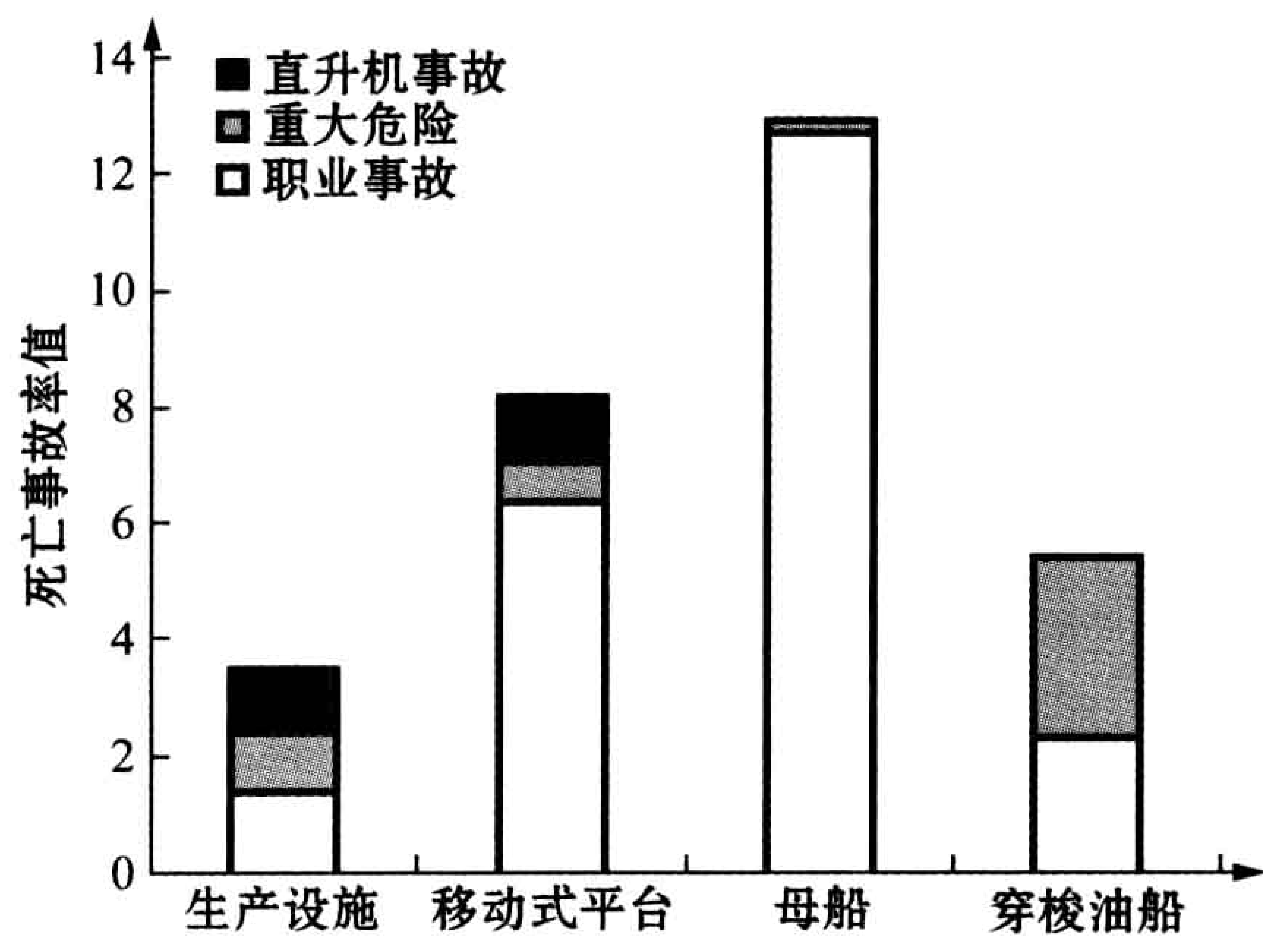


图 3.9　挪威海上设施和船舶死亡风险等级(1999～2008 年)

图 3.9 所示的数值基于每年的总离岸时间,如每离岸 24h,离岸时间就计为 24h。为了累计不同活动产生的影响,这些信息是必需的。因为第 3.1.3 节的数值仅基于工作时间,所以图 3.9 的数值就为第 3.1.3 节的数值的一半。

最大的差别涉及职业事故,移动式离岸钻井平台的风险等级要比海上生产设施高 4.6 倍。根据第 3.1.3 节的数据,有些差别已经变小了。

所有穿梭油船的死亡事故率值为 5.3(死亡数/100^8 工时)(100^8 应该不可能,太大了,认为应该是 10^8,第 3.1.4 节最后一段用过 100 million manhours——译者注),对应的年平均死亡数为 0.10,或者 10 年期间为 1.0。职业事故占事故率总值的 45%。

风险等级项目也面临表达总风险等级所带来的挑战，总风险等级来自职业事故和重大危险风险。基于发生的侥幸脱险情况和所定义的意外事件，项目为重大危险风险制定了指标，这些指标在另一方面也强调了相关的趋势和影响。图 3.10 概述了针对职业事故和直升机事故计算的死亡事故率值，以及基于风险等级项目重大危险指标计算的重大危险风险。

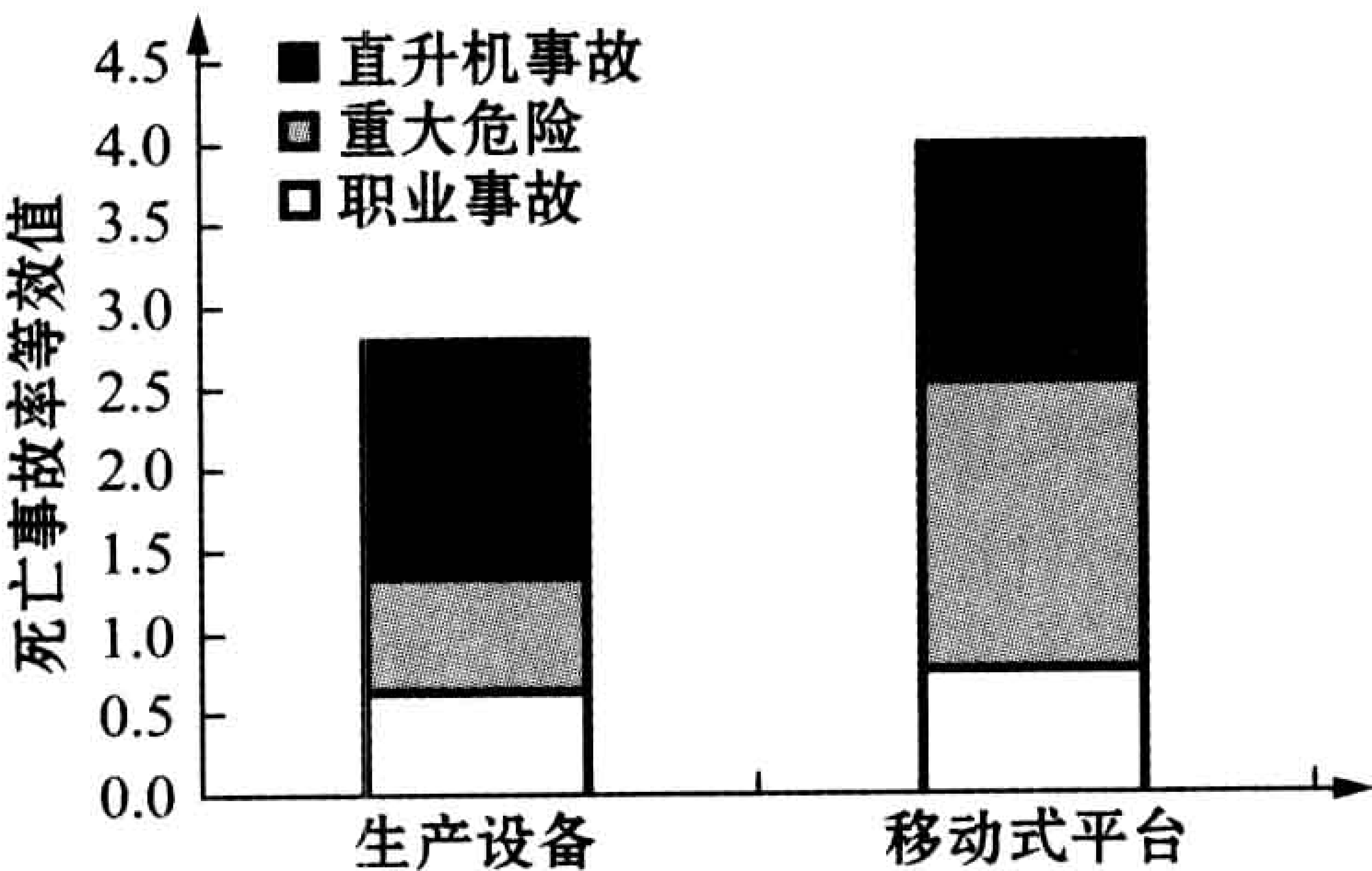


图 3.10　基于事故统计数据和风险等级项目重大危险指标的海上生产设施和移动式平台死亡事故率等效值

3.2　风险接受准则 Risk Acceptance Criteria

3.2.1　定义 Definition

针对挪威离岸业，称为“风险和应急预案分析”的挪威石油标准化组织标准于 1998 年发布，其第二版于 2001 年发布（NORSOK，2001）。相比以前的规范定义（NPD，1990），这个标准对风险接受准则的解读有些不同。以下是不同的措辞：

- 1990 规范定义：准则用于表达活动中的可接受风险等级。
- 挪威石油标准化组织定义：对于所涉及的活动，准则用于表达认为可接

受的风险等级，限于风险的高层面表达。

上面的下划线部分字体为主要区别，并同风险接受准则应该涉及风险表达类型相关。规范的措辞说明风险接受准则在进行任何形式的风险分析之前就应制定。

2001 年发布了挪威石油标准化组织标准的第二版，新规范于 2002 年 1 月 1 日起生效。新规范（PSA，2002b）没有定义风险接受准则，但对挪威石油标准化组织的定义进行了少量修改如下：

- “对于所涉及活动，准则用于表达认为可承受的风险等级。”

2001 年挪威石油标准化组织标准（NORSOK）的内容基于这样的认识：风险接受准则在实际中是无法制定的，对于许多有限范围的定量风险分析和研究也无法有效、合理地使用。因而挪威石油标准化组织在定义中将风险接受准则的使用限于风险的高层面表达。这些表达通常涉及应用于整个海上设施的综合风险估计。对于人员而言，就是诸如潜在人命丧失、平均个体风险、死亡事故率、群体风险以及安全功能损害频率等。

下文将采纳挪威石油标准化组织的风险接受准则定义，并且还将说明挪威石油安全管理局和卫生与安全管理局规定的要求。

3.2.2 理念上的两难 Philosophical Dilemma

挪威离岸法规大约在 1980 年引入第一个风险接受准则，直到 2000 年才得到广泛应用。2002 年 1 月 1 日引入了新监管制度，涉及了风险接受准则以及最低合理可行原则（ALARP）。风险接受准则仍然是风险接受使用的主要方法，但 2004 年以来将最低合理可行原则作为风险接受准则的补充或替代得到了越来越多的关注。最低合理可行原则意味着制定的所有风险降低方案都必须实施，除非成本和/或其他负面影响要明显大于收益。

Aven and Vinnem(2007)认为基于产生并考虑可选方案的方法应该替代基于风险接受准则的机械方法，这类似于符合最低合理可行原则的评估。作者认为从根本上看挪威离岸业的风险接受准则可以从规范要求中删除。

但规范中仍然有关于制定和使用风险接受准则的要求。因而对这个准则的使用进行说明还是非常重要的，即使并不建议使用。

3.2.3 挪威的监管要求 Norwegian Regulatory Requirements

挪威石油安全管理局(PSA)关于接受准则及其使用的要求在健康、环境与安全(HES)管理规范中(PSA，2002b)进行了明确说明。规范由标准化的要求和指导准则组成。规范第 6 节的内容见第 1.5.2 节，以下是第 6 节指导准则的内容：

> 规范第 6 节
> 重大事故风险和环境风险的接受准则
>
> 接受准则指涉及重大事故的可接受风险及涉及环境风险的上限。
>
> 重大事故指涉及几个人员严重受伤或死亡的事故，或者危及设备完整性的事故。
>
> 环境风险指污染的风险，参照框架规范第三章有关涉及健康、环境与安全的原则。
>
> 为了达到第一段及第二段 a 和 b 中提到的重大事故接受准则，应采用 NORSOK Z-013 标准第四章内容。
>
> 当制定第二段 a 中提到的涉及风险的接受准则时，应使用平均风险的方法以确保用于全体人员及特定群体人员的接受准则能够互相补充，也可见 NORSOK Z-013 标准附录 A.2.1.4。
>
> 第二段 c 中提到的涉及环境风险的接受准则应该同设备及设备活动对个别环境资源和生态系统的影响有关。当制定接受准则时，应对大范围内的许多设备进行考虑。如果需要的话，在同其他营运商合作时对于设备活动可能影响的区域应明确可接受的风险等级。当制定接受准则时，应关注管理当局对所处环境基础的考虑，向挪威议会提交的报告，以及设备活动可能影响区域的评估等。

对风险接受准则的主要规范性要求可概述如下：

- 风险接受准则应涵盖所有人员以及面临特定风险的人员群体；
- 风险接受准则应针对人员和环境进行定义；
- 第三方面临的风险仅涉及岸上石油设施；
- 参照第 14 节，人员运输导致的风险应包括在内。

这些要求意味着认识到需要提高能力及促进不同规定之间的联系而采用有意识进行风险评估的方法，并且还说明了风险评估的范围及其在安全管理中的重要性。

3.2.4 英国规范中的风险接受准则要求 Risk Acceptance Criteria Requirements by UK Regulations

英国石油业使用的准则主要由卫生与安全管理局制定并包含在法律规定中。以下进行简要介绍。

3.2.4.1 最低合理可行原则 ALARP Principle

安全案例规范(SCR)(HSE, 2005c)的重点是最低合理可行原则(ALARP)。前一版规范的表 2“固定式海上设施安全案例应包括的具体内容”对此进行了说明，并要求安全案例应包括：

“一个范例，通过参考量化风险评估的结果，性能标准足以将人员健康和安全风险降低到合理可行的最低等级……”

摘录的这段话中，最低合理可行原则和人员安全直接联系在了一起。但在安全案例规范指导准则中(HSE，1992)，同样的原则应用于临时避难所完整性损失(安全案例内容：总则，117 段)。这并不冲突，但应指出的是人员风险也可以通过其他比临时避难所损害更为直接的方法进行表达。

第 1.6.1 节提到过这些内容已经被 2005 版规范删除。但卫生与安全管理局希望在实践中不要进行改变，因为规范其他地方还有类似的要求，所以认为

摘录的这段话仍然是正确的。

3.2.4.2 临时避难所损害 TR Impairment

安全案例规范要求临时避难所完整性损失频率要低于 10^{-3}/年。这个标准常被视为英国海上设施的主要标准。值得注意的是虽然在卫生与安全管理局的规范指导准则中提到了这个标准，但安全案例规范却没有详细说明。

规范详细说明了固定式海上设施和移动式海上设施安全案例的内容，安全案例内容总则对此作了进一步说明。临时避难所是保护人员免受“爆炸、火灾、高温、烟尘、有毒气体或烟雾危险”的措施之一，措施还包括进入和离开临时避难所的逃生通道、撤离方法以及监控意外事件的设备等。以下涉及临时避难所的内容应在安全案例中进行详细说明：

- 临时避难所需要执行的功能；
- 可能威胁临时避难所完整性的意外事件范围；
- 可视为临时避难所完整性损失（损害）条件的准则，需要考虑 4 种主要的失效类型：
  - 结构支持损失；
  - 生命支持损失；
  - 控制支持损失；
  - 撤离有效性损失；
- 面临“设计事件”时，临时避难所必须保持完整性的最少时间（持续时间）。

安全案例规范（SCR）的定量接受准则同临时避难所相关，但规范也要求营运商提供进入和离开临时避难所的逃生通道以及足够的撤离方法。营运商必须对这些功能的准则进行详细说明。

有意思的是这同挪威主要安全功能非常接近，先前的主要安全功能涉及庇护区、逃生通道和撤离站。这显然说明了两种不同法规还是非常相似的。

3.2.4.3 人员风险准则 Personnel Risk Criteria

安全案例规范中唯一的定量准则是临时避难所损害的最大允许频率。这同卡伦报告(Cullen,1990)是一致的,并要求其他准则应由营运商自己说明。

由于这个原因,安全案例工作初始阶段的重点是临时避难所性能及确保符合损害频率的最大上限。但到后期,营运商将会更直接地考虑人员风险,因为要通过预期死亡数、个体死亡风险或其他风险度量来进行说明。

很明显一些营运商支持将个体死亡风险作为风险的一种度量。传统上计算风险是通过考虑人员群体(如生产操作员)并对群体中的个体计算年预期死亡事故风险。

这是非常直接的风险度量,但也有其缺点,主要是因为没有表达出一个海上设施的整体风险。虽然有些措施能够有效降低个体风险最高的群体的风险,但降低整个平台总风险却未必是最有效的,为此整个平台的总预期死亡数是更为有用的风险度量。

卫生与安全管理局在支持文件中说明重大危险导致的平均个体风险为每年 $1 \cdot 10^{-3}$,见表 3.1。

表 3.5 摘录自健康、安全和环保报告(HSE,1992),对不同行业和职业人员死亡风险进行了概述。基于 1986/87 到 1990/91 年间的英国事故统计数据。

离岸油气业每人每年的平均风险等级为 10^{-3}。还只是考虑"重大危险",没有包括运送或职业事故。

对应于每人每年工作时间大约为 3200h,平均个体风险 $=10^{-3}$ 的死亡事故率值为 32。

表 3.5 评价人员死亡风险的比较基础

行　业	人员年个体死亡风险等级
英国注册船舶上的深海渔民	1/750
矿物油气开采	1/999
矿物矿石开采	1/3 900
煤炭开采	1/7 100
建筑	1/10 200
农业	1/13 500
金属制造业	1/17 000

应注意 10^{-3}/年这个值的计算包含了“帕玻尔·阿尔法”平台事故，这对于计算风险等级有很大的影响。挪威统计数据显示不管包含或不包含“亚历山大·基尔兰德”钻井平台事故，风险等级几乎都是一个数量级的。英国也有类似情况，不管是否包含“帕玻尔·阿尔法”平台事故。

3.2.5　挪威石油标准化组织的要求 NORSOK Requirements

挪威石油标准化组织的风险及应急预案分析标准(NORSOK,2001)要求制定能有效使用的风险接受准则。为了使风险接受准则能支持健康、环境与安全(HES)管理决策，需要具备以下特点：

- 适合于涉及风险降低措施的决策；
- 适合于交流；
- 构成明确；
- 独立于概念，比如不倾向于任何特定概念。

值得注意的是对于涉及人员风险的风险接受准则，挪威石油标准化组织的标准没有就选择什么实际值提供任何指导。这主要是符合挪威管理当局的要求，即由营运商自己制定风险接受准则，但是如果制定一些指导准则的话也不会让人感到意外。涉及环境风险时情况就不同了。挪威石油工业协会指导准则(OLF,2001)对于如何为环境风险制定风险接受准则提供了指导，包括一些例子。

对于制定涉及人员风险的风险接受准则，挪威石油标准化组织标准只限于一般的要求。以下将分别对这些要求进行论述。

3.2.5.1　降低风险决策的适用性 Suitability for Risk Reduction Decision-making

在决策过程中能方便使用的风险接受准则通常都很明确，并同海上设施或活动的特定要素相关。这种风险接受准则适合于度量降低风险行为及其他设计或作业变化所产生的影响。

3.2.5.2 交流适用性 Suitability for Communication

为了适合于交流,风险接受准则应做到:

- 非专业人员容易理解;
- 可以同其他活动进行风险比较。

风险接受的交流涉及相关各方如何解读和理解准则,如面临的风险以及公司、管理当局和公众的管理等。

而另一方面,如果涉及问题非常复杂或难以理解,容易理解的风险接受准则就可能过于简化。

风险接受准则表达了社会维度,可以同其他社会活动进行比较。这种风险接受准则通常与事件序列后期的参数相关(如死亡数)。

3.2.5.3 与明确性相关的适用性 Suitability with Respect to Unambiguity

此处的明确性指制定风险接受准则时,表达或评估风险等级应不会产生不合理影响或意外影响。不确定性问题可能涉及:

- 风险接受准则制定得不准确;
- 分析的系统范围定义不明确;
- 平均风险的替代方法。

3.2.5.4 与概念独立性相关的适用性 Suitability with Respect to Independency of Concepts

另外一个可能问题是不同的风险接受准则可能针对相同类型的风险(如通过死亡事故率或对主要安全功能的损害风险来表达人员风险)。这种情况下考虑不同的风险接受准则时替代方案可能导致不同的风险等级。

3.3　用于石油业人员风险的准则 Criteria used for Personnel Risk by Petroleum Industry

以下讨论将阐述挪威公司制定其风险接受准则的一些重要内容。必须指出使用的值只是说明性的，不同的营运商可能会有非常大的差别。考虑以下类型的风险接受准则：

- 潜在人命丧失（PLL）；
- 死亡事故率（FAR）；
- 平均个体风险（AIR）；
- 频数（f-N）；
- 风险矩阵。

3.3.1　群体平均风险 Group Average Risk

挪威油气离岸营运商主要使用两种风险接受准则。挪威国家石油公司和一些公司规定将死亡事故率＝10 作为表达所有海上设施工作人员风险平均值的风险接受界限。

规范还要求为风险等级最高的群体/个体制定风险接受界限。一些公司规定将死亡事故率＝20 作为风险等级最高的群体的风险接受界限。

挪威营运商主要使用的另一种风险接受准则是将平均个体风险＝每年 0.001作为风险接受界限。一些公司明确规定这就是风险等级最高的群体的风险接受界限，其他公司则没有明确要求。

第 2 章说明平均个体风险＝每年 0.001 对应的死亡事故率刚好超过 30，因而两者的系数关系大约是 3。尽管可以认为死亡事故率＝10 是现实的，但稍高的界限，如平均个体风险＝每年 0.001 就是非常高而不严格的界限，没有降低

风险的潜力。即使将平均个体风险＝每年 0.001 作为风险等级最高的群体的风险接受界限,也几乎没有降低风险的潜力。

对于大型综合海上设施,死亡事故率＝10 在一定程度上是不难达到的,但对于小型海上设施还是非常有挑战性的。如果将死亡事故率＝10 作为风险等级最高的群体的风险接受界限,对于所有海上设施都将是个挑战。

3.3.2 风险分布 Risk Distribution

一家挪威公司使用频数(f-N)曲线作为风险接受界限。对于人员总数为 100 的海上设施,曲线可表达如下:

$$f(N) = \frac{0.01}{N} \tag{3.1}$$

使用式 2.16,就对应于平均死亡事故率＝5.9,说明这是比平均死亡事故率＝10 更有挑战性的界限。并且还用分布替代单一的数值,使得达到这个界限更具挑战性。

根据最大人员总数对数值进行如下调整。对于最大人员总数为 M 的海上设施,根据式 3.1 对数值按以下系数进行调整:

$$\sqrt{\frac{M}{100}}$$

3.3.3 潜在人命丧失(PLL) Potential Loss of Life (PLL)

通常不会为潜在人命丧失定义接受界限,但在有些情况下潜在人命丧失可能要用于决策。潜在人命丧失非常适合于对开发目标相同的可选方案进行比较。这样目标就应该是尽量降低潜在人命丧失的值。

由于是对死亡事故的绝对水平进行计算,所以非专业人员也很容易理解潜在人命丧失。但其接受界限并没有考虑人员的数量,所以如果人员数量不同的话,同其他活动进行比较时就必须非常注意这一点。

而另一方面潜在人命丧失很难用具体词语来表达，因为值通常低于 1.0。潜在人命丧失为 0.1 并不意味着 10%的人员死亡！可以用发生一起死亡事故的概率是 10%来说明这个数值，虽然不太准确，因为也有发生超过一起死亡事故的小概率可能。

通常可以明确定义潜在人命丧失。但潜在人命丧失不是非常适合于平均人员群体之间的差异。

潜在人命丧失数值对于最低配员水平的开发理念通常是有帮助的，配员水平低是由于面临风险的人员更少了。这也强调了降低社会风险的一个方法是限制面临风险的人员数。

3.4　环境溢出风险的风险接受准则 Risk Acceptance Criteria for Environmental Spill Risk

关于如何制定针对环境的风险接受准则的最新文献是挪威石油工业协会环境风险分析报告(OLF，2001)。环境溢出风险接受准则的发展基于以下主要原则：

- 根据到达海岸线污染物的量对环境损害进行分类；
- 环境损害主要通过环境损害持续时间(比如直至环境恢复)进行表达；
- 对于损害发生的预期时间而言，环境损害持续时间应该是不重要的。

第一个原则在远海应当不成问题，但如果是在近岸水域或环境敏感区域进行作业，可能要忽略这个原则，因为针对这些情况的污染物漂流模型太过简略。

第二个原则必须基于假定能确定有限的恢复时间，比如对环境的损害不是不可补救的。环境专家对此有些抵触，认为有时损害程度太严重，以至于无法恢复。

第三个原则主观认为非常合理，事实根据是除了 1996 年“布莱尔”号油船

导致的溢出外，过去30年里北海没有发生过溢出事故，那次溢出的恢复期超过1年。有些人倾向于将“布莱尔”号油船溢出事故同离岸业联系起来，但确实应该将其视为一次“普通”的油船事故。而另一方面，第三个原则在实际中实施是有些困难的。Vinnem(1997b)对此进行了深入探讨，概述如下。

3.4.1 初始方法 Initial Approach

挪威最早针对环境的风险接受方法的依据是按照环境后果对海洋生命的影响，将其划分为3种类型，频率范围见表3.6。发生于沿岸地区的溢出，其可能的影响应根据对风、波浪、海流以及地形影响的评估来确定。粗略的估计应该就能满足需要，除非是重大风险，这种情况下可能需要进行石油扩散仿真。

环境溢出风险应在油田开采期内所有油田设施(在“每个油田”基础上)平均风险等级的基础上进行考虑。

表3.6 针对环境的风险接受准则的初始方法

影响类型	典型影响	可接受超标准数年频率
重大长期影响	环境影响5年内无法恢复 影响超过100km海岸线 溢出对野生动植物造成重大影响	$1 \cdot 10^{-5}$
较大影响	环境影响2～5年内无法恢复 影响超过10km海岸线 溢出对野生动植物造成较大影响	$1 \cdot 10^{-3}$
轻微影响	环境影响2年内无法恢复 影响超过1km海岸线 溢出对野生动植物造成有限影响	$1 \cdot 10^{-2}$

3.4.2 当前方法 Current Approach

挪威离岸业的“当前”方法同样基于上述的总体原则。当涉及可能会影响最有价值的资源时，应建立事故再次发生同持续时间之间的关系。准则可应用

于 3 个层面：

- 针对油田的数值；
- 针对海上设施的数值；
- 针对作业的数值。

同海上设施相关的准则应该用于涉及海上设施的所有活动，这些活动可一起进行考虑。同特定作业相关的准则应该用于单独作业，比如探井钻孔。

不能将风险接受准则视为明确的界限。当风险后果在最低合理可行原则范围内时，始终应考虑降低风险的措施。对于可接受的风险等级，风险接受准则应适用于所有环境损害类型。

对于环境风险，频率和后果都应进行量化。进行风险呈现可能最好是使用与建模精度保持一致的风险矩阵。但有时使用的连续函数却常常会留下不能保证精度的错误印象。

根据考虑的是油田、海上设施或是作业，接受界限在数量上是不同的。应该在哪个层面上考虑接受准则并不总是显而易见，每个案例都必须明确决定。如果不能确定，建议使用最高的层面，比如先考虑与油田相关，后考虑与海上设施相关；先考虑与海上设施相关，后考虑与作业相关。

环境损害的类型定义如下：

- 轻微：环境损害可在 1 个月至 1 年之间恢复；
- 中等：环境损害可在 1 年至 3 年之间恢复；
- 较大：环境损害可在 3 年至 10 年之间恢复；
- 严重：环境损害的恢复需要 10 年以上。

假定采用以下平均活动水平作为挪威大陆架开发的依据：

- 环境资源同海上设施之间的联系要通过“影响区域”，即可能受到溢出影响的部分海岸线。这意味着只有当资源位于海上设施影响区域之内时才可能受到损害；
- 任何环境资源假定平均位于 5 个油/气田的影响区域之内；
- 每个油田有两个海上设施，其影响区域相同；

● 每个海上设施每年平均进行 10 次可能导致大量溢出的作业。

将资源及资源的恢复作为方法的起点。从资源的角度来看，哪个海上设施是溢出源并不重要。主要根据特定资源总体暴露于意外溢出的时间不应长于可视为“较小影响”所对应的时间。

上述的总体原则意味着同环境损害的预期时间比较，其发生后的恢复时间应该短于“较小影响”所对应的时间。每个营运商都必须确定什么是“较小影响”。挪威石油工业协会的标准介绍了下面的例子：在数值 0.5%、1%、2%、5%或 10%中，标准使用了 5%来进行说明。视 5%为“较小影响”所产生的准则就是平均恢复时间为 0.5 年的轻微环境损害，其发生频率不会超过每 10 年一次。类似的解释可应用于环境损害的每种类型，结果见表 3.7。

表 3.7　目前用于环境风险的风险接受准则

环境损害类型	“平均”恢复时间	可接受频率范围
轻微	1/2 年	＜每 10 年发生 1 次事件
中等	2 年	＜每 40 年发生 1 次事件
较大	5 年	＜每 100 年发生 1 次事件
严重	20 年	＜每 400 年发生 1 次事件

然后就可以考虑对所有挪威离岸业使用 5%代表“较小影响”污染所产生的影响。有 4 种损害类型，5 种典型的离岸区域，一共 20 种组合。每种区域和类型为 5%，挪威离岸业总计就是 100%。就算是使用 0.5%也意味着挪威海岸一些地方有 10%的时间发生了某种类型的环境损害。请注意表中的“平均恢复时间”是每种恢复类型的平均值。

以下方法用于将表 3.7 中的数值分解为适用于海上设施和作业的值：如果区域中的环境可以承受频率为每 10y 一次的轻微环境损害，那么就能解读为：

● 对于海上设施超过一个的油田：　“频率范围的 1/5”，如每 50 年发生 1 次事件；

● 对于海上设施：　“频率范围的 1/10”，如每 100 年发生 1 次事件；

- 对于作业：　　　　　　　　　　“频率范围的 1/100”，如每 1 000 年发生1 次事件。

因而表 3.7 中的值就可以表示为针对油田、海上设施和作业每种损害类型的频率，如表 3.8 所示。

如最低合理可行原则区就可定义在可接受范围的 10%到 100%之间。可接受范围必须由营运商进行定义。

实例：对于海上设施的“轻微”环境损害，可计算出以下可接受范围：

- 可接受环境风险：可能要评估风险降低措施，但不是必须的：　　$< 0.1 \cdot 10^{-2}$/年
- 可接受环境风险：应评估风险降低措施：　　$0.1 \sim 1 \cdot 10^{-2}$/年
- 不可接受环境风险：应实施风险降低措施，并重新分析环境风险：　　$\geq 1 \cdot 10^{-2}$/年

表 3.8　油田、海上设施和作业的风险接受范围

环境损害	针对油田的年频率范围	针对海上设施的年频率范围	针对作业的年频率范围
轻微	$< 2 \cdot 10^{-2}$	$< 1 \cdot 10^{-2}$	$< 1 \cdot 10^{-3}$
中等	$< 5 \cdot 10^{-3}$	$< 2.5 \cdot 10^{-3}$	$< 2.5 \cdot 10^{-4}$
较大	$< 2 \cdot 10^{-3}$	$< 1 \cdot 10^{-3}$	$< 1 \cdot 10^{-4}$
严重	$< 5 \cdot 10^{-4}$	$< 2.5 \cdot 10^{-4}$	$< 2.5 \cdot 10^{-5}$

3.4.3　准则适用吗？ Suitable Criteria?

这些风险接受准则给人留下的第一个印象是形成了合理的准则集，通过包含油田层面的值以及对海上设施和作业的要求，应该可以表达出环境风险的总体范围。但准则有些方面还需进一步关注：

- 准则的推导方法说明假定这些值都是基于经验数据的，对于罕见事件就

不适用。例如,在 40 年开采和生产过程中,只发生了一次导致较大溢油的井喷,并且这次溢出没有到达海岸。
- 前一节中解读“较小影响”时所涉及的层面(特别是如果使用了 5%)可能对应的风险等级太高。

总之,上述推导方法有些缺点,应进一步发展。Vinnem(1997b)提出了一个替代方法。

此外还有许多涉及准则使用的复杂方面没有得到充分考虑:

- 如果油田的海上设施数多于(或少于)推导方法中使用的平均值的话,应该做些什么?应使用平均值还是实际值?
- 风险的量化是针对最有价值的资源或少数几个最有价值的资源,因而风险量化的值就是代表值,而不是所有影响的总和。

3.4.4 新方法 New Approach

挪威水电公司和挪威国家石油公司正在合作开发新方法,挪威科技工业研究院和挪威船级社也参与了项目。Nilsen H et. al.(2005)在 2005 年国际海洋环境建模研讨会上介绍了初步进展。

新方法引入了环境影响因素(EIF)来评估排放采油废水的环境风险。为评估涉及石油意外排放的风险,目前正在开发用于严重溢油风险评估(严重影响环境的因素)的环境影响因素模型。严重影响环境的因素应:

- 在一定层面上可以与应用于采油废水的环境影响因素概念进行比较,并说明存在易受石油污染的环境资源;
- 包含不同环境成分(水团、海面和海岸)中环境风险损害的度量,度量具有可比性;
- 能够包含意外事件的预期概率或频率以及损害的程度和持续时间;
- 适用于世界各地的单独海上设施、油田和油区;
- 可作为环境管理工具,允许对风险降低工作进行分析。

计划在 3 个层面上对严重影响环境的因素进行计算：

- 第一层对溢油量超出每个环境成分阈值水平的区域（影响区域）进行计算；
- 第二层对预期存在易受石油污染的环境资源区域及影响区域之间的重叠部分进行计算并可视化；
- 第三层对易受石油污染的环境资源上的动植物所受影响程度及持续时间综合值进行评估。

3.5 物质损失/生产延误的风险 Risk of Material Damage/Production Delay

生产延误常可用于表达物质损失风险。通常针对以下延误类型确定导致（相当于全部生产能力）延误的事件频率：

- 1～7 天；
- 1 周～3 个月；
- 3 个月～1 年；
- 1 年～2 年；
- 2 年以上。

意外延误对生产停顿的影响应该比较小，如少于生产总停顿时间的 1/10。应采用风险规避方法使最严重事故对总风险的影响降低到最小。

针对资产风险定义明确的风险接受准则并不是通常的做法。一般方法是对风险进行分析，并在成本收益分析的基础上实施降低风险的措施。

3.6 大型离岸建筑施工建造临时阶段的风险接受准则 Risk Acceptance Criteria for Temporary Phases

通常在大型离岸建筑施工建造临时阶段，结构失效概率是需要考虑的安全因素。但对于离岸安全而言并不适合，离岸安全（根据挪威法规）应涵盖：

- 人员；
- 环境；
- 物质资产/投资。

这意味着安全目标及风险接受准则需将重点放在上述风险的 3 个方面上。在建造和安装阶段，安全管理的总体目标为：

- 保护从事建造和安装活动的人员；
- 保护建筑和设备投资。

尽管保护环境也是营运商的责任，但在建造和安装阶段很少会发生导致较大污染的事故。因而不将其视为一个主要目标，但为了完整也需要进行说明。

制定用于临时阶段的风险接受准则也有过几次尝试，如用于安装阶段。但经验说明不应该制定不实用的定量准则。经常使用的方法是风险矩阵，并结合基于最低合理可行原则的方法以降低风险。

第 4 章　重大事故的教训

Lessons from Major Accidents

过去重大事故的经验是预防将来发生类似事故的重要信息来源。20 世纪后半叶世界上发生过多起重大事故。但最近的 15～20 年里有了积极的发展趋势，重大事故越来越少。

这是在朝着正确的方向前进，但从重大事故中汲取的经验可能会被遗忘，不为后人所知。因而将重大事故的经验以简明、全面的方式记录下来就非常重要。这些信息不仅有益于海上设施风险建模，而且可以作为背景信息解释为什么必须达到一些要求以及为什么这些要求很重要。

本书重点关注位于西北欧、北太平洋、南中国海等环境恶劣地区发生的重大事故，还包括了其他地区发生的一些重大事故，这些事故能为将来提供重要的教训和信息。

本书还包括一些有重大事故隐患或侥幸脱险的事故，这些事故可能发展为重大事故，并且能提供预防将来发生类似事故的重要信息。这些事故都来自北海，主要是挪威大陆架。

对于每起事故都将介绍主要事件序列及失效和未失效的屏障。另外，还将明确介绍所得到的教训。有些案例能提供深入的信息，特别是指定了正式调查委员会或进行了公开调查的事故。而没有进行全面调查的案例，所提供的信息就比较有限。

根据引发事件序列的事件类型以及时间顺序对事件进行了分类。使用的危险类别如下：

- 井喷；
- 导致火灾和/或爆炸的海上设施碳氢化合物泄漏；
- 可能导致火灾/或爆炸的管线/立管碳氢化合物泄漏；
- 可能导致全部损失的海上事故和结构失效；
- 其他事故。

表 4.1　书中所述重大事故及侥幸脱险事故概览

发生危险的地区	井　喷	生产泄漏	管线/立管泄漏	海上事故	其他事故
英国	海洋奥德赛，1989 年	帕玻尔·阿尔法，1988 年 布伦特·阿尔法，1988 年			

（续表）

发生危险的地区	井　喷	生产泄漏	管线/立管泄漏	海上事故	其他事故
挪威	埃科菲斯克·布拉沃，1977 年 西部前卫，1985 年		埃科菲斯克·阿尔法，1975 年 左敦，2004 年	深海钻探者，1976 年 亚历山大·基尔兰德，1980 年 西伽马，1990 年 “挪纳”号穿梭油船，2000 年 海洋前卫，2004 年	
加拿大				海洋突击者，1982 年	
巴西	恩绍瓦，1984 年			P-36，2001 年 P-34，2004 年	
南中国海	西克雷斯特，1989 年				
其他地区	埃克斯托克，1979 年			渤海 II，1979 年 爪哇海，1983 年	埃克森·瓦尔迪兹，1989 年

第 2.5.2 节介绍过涉及屏障的术语。本书使用以下分类：

失去控制，碳氢化合物：

HL1. 设计用于维持生产系统完整性的屏障功能。

HL2. 设计用于预防起火的屏障功能。

HL3. 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能。

HL4. 设计用于预防事态加剧的屏障功能。

HL5. 设计用于预防死亡事故的屏障功能。

结构性能损失：

STR1. 设计用于维护结构完整性和海上控制的屏障功能。

STR2. 设计用于预防初始失效加剧的屏障功能。

STR3. 设计用于预防全部损失的屏障功能。

STR4. 设计用于预防死亡事故的屏障功能。

下文论述意外事件和事故时将对这些屏障功能进行全面介绍。论述不以每个特定的屏障功能作为重点，但会在总体上涉及这些屏障功能。

4.1 “埃科菲斯克·布拉沃”号平台井喷 Ekofisk B Blowout

这起事故的介绍基于撤离方法报告(NPD,1998)。

4.1.1 事件序列 Event Sequence

1977 年 4 月 23 日,在对生产井进行维修的过程中,钢导管架井口平台“埃科菲斯克·布拉沃”号发生了井喷。平台上的井喷防止器没有准备好,也无法及时重新装配。通过救生舱和一条小船所有人员都安全撤离,随后他们被一艘供应船救援。井喷后对油井进行了 7d 机械封堵,封堵由美国油井控制专家实施。溢油量大约为 20 000m^3,但油污没有达到海岸。为进行清理作业,平台生产停顿了 6w。事故基本没有对平台造成物资损失。

“埃科菲斯克·布拉沃”号平台井喷是北海挪威离岸业唯一导致大量石油溢出的井喷。

4.1.2 屏障性能 Barrier Performance

失效的屏障为油井控制屏障,超出了本文的讨论范围。但可以注意到所涉及屏障是作业屏障。除了油井控制屏障,其他屏障都没有失效。

为预防井喷发展为对人员造成严重后果的灾难,需要实施以下屏障功能:

- 预防起火;
- 预防死亡事故。

值得注意的是本案例预防了起火的发生。按当时的统计数据,约井喷 1/3 后会发生起火。由正在进行的作业或钻井区设备导致起火并不意外。

“埃科菲斯克·布拉沃”号平台井喷是发生在挪威大陆架没有造成死亡的少数几起重大事故之一。以下屏障系统实施得非常成功：

- 在良好的天气情况下，成功使用了传统撤离方法，没有造成伤亡；
- 在良好的天气情况下，供应船成功实施救援作业（从撤离设施中）。

屏障性能概述如下：

HL1. 设计用于维持油井系统完整性的屏障功能：失效。
HL2. 设计用于预防起火的屏障功能：成功。
HL3. 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能：不适用。
HL4. 设计用于预防事态加剧的屏障功能：成功。
HL5. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：成功。

4.1.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

这起事故中没有涉及设计方面的教训。

4.1.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

“埃科菲斯克·布拉沃”号平台井喷没有造成死亡，物资损失也只限于需要清除的溢油。从事故中吸取教训是：

- 对平台井喷进行机械封堵是可能的，尽管需要一定的时间。

其他一些涉及成功撤离的教训已在上文中进行了论述。

4.2 “埃克斯托克”勘探井井喷 Ixtoc Blowout

本节内容基于国家海洋和大气管理署国家海洋局响应和恢复办公室危险物资响应科所公布的网页信息。

4.2.1 事件序列 Event Sequence

1979 年 6 月 3 日，位于美国得克萨斯州以南约 850km 的墨西哥湾坎佩切海湾中的“埃克斯托克 I”勘探井发生了井喷。“埃克斯托克 I”勘探井由租借自墨西哥石油公司(PEMEX)的半潜式钻井平台“赛德科 135”号进行钻探。钻探泥浆循环漏失导致井喷。喷出的油气起火，使平台发生火灾。火灾导致井架倒塌在井口区域，任何直接控制井喷的努力都受到阻碍。

墨西哥石油公司从雷德・亚戴尔公司、玛泰克公司以及潜水公司聘请了井喷控制专家及其他溢出控制专家。玛泰克公司向现场派出了 50 名人员、遥控设备 TREC 以及先锋 I 潜水器，并试图通过 TREC 找到通往井喷防止器(BOP)的安全路径。这是十分复杂的，由于能见度很差、包括井架残骸在内的海底碎屑物以及 3000m 钻杆等因素。最终潜水员到达并关闭了井喷防止器，但油气压力使阀门开始破裂，为防止损坏井喷防止器又重新被打开。

为降低油井压力并使救援人员能够对油井进行封堵而打了两口救援井。还聘请了挪威专家使用撇油设备和围油栏开始清除溢油。“埃克斯托克 I”勘探井以每天 10 000～30 000bbls 的速度持续溢出原油，一直到 1980 年 3 月 23 日最终被封堵为止。估计溢油量总计达到 3 522 400bbls。

墨西哥湾西部盛行的向北洋流将溢油带往美国。100km×110km 的油带携带着 90m×150m 大小的稠油块飘向得克萨斯州海岸。1979 年 8 月 6 日，长达 17mile 的得克萨斯州海滩受到焦油球的影响。到 9 月 1 日，得克萨斯州所有南部海滩都受到溢油的影响。9 月 13 至 15 日的暴雨冲刷掉了大部分油污。

在溢出的最初阶段，估计每天有 30 000bbls 原油从油井流出。1979 年

7 月，通过将泥浆注入油井，每天溢出量减少到 20 000bbls，8 月上旬在油井所在位置投入近 100 000t 吨钢、铁和铅球后，每天溢出量减少到 10 000bbls。墨西哥管理当局还向主井打了两口救援井以降低井喷压力。

墨西哥石油公司声称在溢油到达海面时一半已燃烧掉，1/3 已蒸发，剩下的得到控制或散布到海里。

墨西哥石油公司雇用航空公司向溢油喷洒化学分散剂。共进行了大约 500 次空中作业，处理了 1 100square miles 浮油。美国受到溢油影响的地区没有使用化学分散剂，因为化学分散剂不能处理风化油污。最后现场指挥要求墨西哥在北纬 25°以北停止使用化学分散剂。

得克萨斯州重点在海岸采取措施以保护堰洲岛形成的海湾和泻湖，避免海湾和泻湖入口受油污影响的重要性要高于堰洲岛海滩。保护措施是设置撇油设备和围油栏，主要集中在一些选定的位置。经济和环境都很敏感的堰洲岛海滩每天都进行清除工作。工人使用耙子和铲子而不是大型设备清理海滩，因为大型设备会挖走太多沙子。

最终约有 71 500bbls 原油影响了 162mile 美国海岸，清除的污染物超过 10 000cubic yards。

1979 年 8 月 8 日起，美国渔业及野生动物管理局（USFWS）开始培训志愿者处理受到原油污染的鸟类并在南帕诸岛海滩进行巡逻。美国渔业及野生动物管理局在野马岛和南帕诸岛设立了鸟类清理站。由于鸟类从受污染海岸线的固定栖息地迁移离开，总体上鸟类密度减小了，这可以说明为什么只发现了几只受到原油污染的死鸟。海滩清理干净后，鸟类密度又增加了，但还未达到预期水平。食物污染导致许多鸟类在溢油污染期间离开其栖息地。总共发现了 1 421 只羽毛或脚受到原油污染的鸟。

对于“埃克斯托克 I”勘探井溢油对得克萨斯州海岸线的预期影响，美国政府有两个月的准备时间。在此期间，美国政府认识到将海岸线与油污敏感性建立对应关系的重要性。因而实施了相应的项目并生成了最早的环境敏感性指标（ESI）。政府在研究了环境敏感性并反映为环境敏感性指标后，完成了对围油栏及其他处理设备的设置。

“埃克斯托克 I”勘探井溢油控制和清除的责任与协调情况是比较特殊的。美国政府在没有同墨西哥政府先期协商的情况下就公开要求墨西哥对溢油造成的损失进行赔偿。墨西哥拒绝在经济上对所发生的损失负责，也不同意帮助支付美国清除油污的费用。

官方报道在溢油期间,得克萨斯州沿岸的旅游业下降了 60%。清除费用达 1 250 万美元。

半潜式钻井平台受损严重,下部结构、井架、钻井机械及箱形梁完全被破坏。该平台宣布全部损失,随后沉没于墨西哥湾深水中。

4.2.2 屏障性能 Barrier Performance

在这个案例中,屏障失效也同样与油井控制措施相关。泥浆循环漏失是油井控制的操作事故。当起下钻时发生油井控制失效是涉及钻井的最危险情况。

另外一个失效的屏障功能是起火预防。起火原因不明。

钻井平台上的 63 名工人成功撤离。预防死亡事故的屏障功能成功实施。

完成油井控制作业用去 9mth 时间,包括打了两口救援井。

屏障性能概述如下:

HL1. 设计用于维持油井系统完整性的屏障功能:失效。

HL2. 设计用于预防起火的屏障功能:失效。

HL3. 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能:不适用。

HL4. 设计用于预防事态加剧的屏障功能:失效。

HL5. 设计用于预防死亡事故的屏障功能:成功。

4.2.3 吸取的教训 Lessons Learned

这起事故中涉及设计和营运的教训尚不清楚。

4.3 “恩绍瓦”号生产平台井喷 Enchova Blowout

这起事故的介绍基于撤离方法报告(NPD,1998)。

4.3.1 事件序列 Event Sequence

1984 年 8 月 16 日，巴西固定式导管架生产平台“恩绍瓦 1”号发生了井喷和火灾。通过 10 口油井，平台每天可以生产 40 000bbls 原油和 $1.5 \cdot 10^6 m^3$ 天然气。钻井时泄漏的天然气导致火灾。

平台发生了两起火灾。在原油泄漏导致产生爆炸冲击波时第一起火灾得到了控制。第二天火灾被扑灭。平台的钻井设备内部被毁坏，但平台的其余部分保持完好。

人员开始撤离，但放下救生艇时却造成 36 人死亡。降落救生艇的一条艇索因为没有正确释放而断裂，产生的冲击载荷导致艇艏钩损坏。救生艇垂直悬挂于空中直至艇尾支撑断裂并坠落 10m 掉入海中。另外还有 6 人因从 30～40m 高度跳入海中而丧命。

直升机从平台和救生艇上救援出 207 名幸存者。共有 42 人死亡，都是撤离过程中的两起事故所导致。

4.3.2 屏障性能 Barrier Performance

井喷起因超出了本书的讨论范围。随后的原油泄漏及起火原因不明。只观察到以下屏障功能失效：

- 预防失去控制；
- 预防死亡事故(通过撤离)。

预防死亡事故失效是由于释放救生艇时的人为事故所致，这说明了传统救生艇释放机构的脆弱性。

没有得到这起事故中关于屏障成功的信息。屏障性能概述如下：

HL1. 设计用于维持油井系统完整性的屏障功能：失效。

HL2. 设计用于预防起火的屏障功能：失效。

HL3. 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能:失效。

HL4. 设计用于预防事态加剧的屏障功能:成功。

HL5. 设计用于预防死亡事故的屏障功能:失效。

4.3.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

这起事故说明了使用传统救生艇进行撤离的危险性。在其他事故中也发生过因各种原因导致艇艏钩损坏而使人员处于极度危险的境地。

4.3.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

本案例中未能正确操作救生艇的原因不明,推测有以下可能:能力不足显然是没有正确操作并释放救生艇的一个可能解释;另外一个可能的解释是恐慌。

4.4 "西部前卫"号钻井平台气体井喷 West Vanguard Gas Blowout

这起事故的介绍基于已发布的官方调查报告(NOU,1986)以及事故发生后不久作者对海上设施的探访。

4.4.1 事件序列 Event Sequence

1985 年 10 月 6 日,半潜式移动钻井平台"西部前卫"号在挪威海哈尔滕班肯地区进行勘探钻井时发生了浅层气井喷。

在当天早些时候的 13 时开始钻 12¼inch 领眼，根据正常做法连接了海底取油立管，但没有安装井喷防止器。21 时不到钻头进入海床下 236m 的薄气层，气体涌入井孔，约一小时后气体第二次涌入。气体第三次涌入导致了气体井喷，时间大约为 23 时。

当钻井人员觉察到发生的情况时，开始注入重泥浆并打开分流阀使气流偏离钻台。仅仅几分钟的冲蚀就导致分流器弯管泄漏，气体从下部进入底甲板。虽然意识到平台上所有区域都有起火的危险，但释放海床上海底取油立管井口连接器的尝试并不成功。

机舱可能于 23 时 20 分前起火并引发强烈的爆炸，随后是火灾及再次爆炸。图 4.1 可见机舱受到的破坏。可以看出机舱外壁因爆炸冲击载荷而完全炸飞了。



图 4.1　爆炸后的“西部前卫”号钻井平台机舱，面向海洋方向

爆炸发生时正在放下 2 号救生艇，然后是 1 号救生艇。爆炸发生后平台经理试图释放 4 条锚索，但只释放了 3 条。稳性经理和平台经理后来穿上救生服，从前柱爬下逃生。

其中一人游了大约 100m 到达守备船，而另一人则逐渐漂离，而后被守备船

的快速救援艇救起。

1½到2h后，两艘救生艇上的人员都转移到守备船上，因天气情况良好，整个过程很顺利。守备船在最初的一个小时里优先搜寻一个失踪人员，但一直没有找到。

4.4.2 屏障性能 Barrier Performance

在这起事故中屏障失效是很严重的，初始失效同钻井穿过浅层气带过程中的油井控制相关。这超出了本书讨论的范围，但需要指出的是如果不安装井喷防止器的话，现在钻井穿过浅层气带通常不使用海底取油立管。

分流器失效也同浅层气井喷场景的油井控制措施相关，其细节超出了本书讨论的范围。

第二个屏障功能失效是预防海上设施周围气云起火失效。可能性最大的起火原因是机舱里的柴油发电机，尽管柴油机上安装了灭火器。

撤离过程中预防死亡事故的屏障功能非常成功，只有一个例外。事故后有个人一直没有找到，怀疑在第一次爆炸时落入海里。

预防初始爆炸及火灾事态加剧的屏障同样很成功。机舱被完全烧毁，但这是唯一被完全毁坏的舱室。

救援作业也很成功，尽管有些暗，但在良好的天气情况下，两艘救生艇上的所有人员都被成功救援。从海中救援两名身穿救生服的人员也成功了，但有些危险，因为至少其中一人开始漂离守备船。屏障性能概述如下：

HL1. 设计用于维持油井系统完整性的屏障功能：失效。

HL2. 设计用于预防起火的屏障功能：失效。

HL3. 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能：不适用。

HL4. 设计用于预防事态加剧的屏障功能：失效。

HL5. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：总体成功，有限失效。

4.4.3　吸取设计教训
Lessons Learned for Design

这个案例吸取的教训与油井控制和营运非常相关，如下所述。

4.4.4　吸取营运教训
Lessons Learned for Operation

调查委员会进行了官方调查并发布了正式报告（NOU，1986），主要关注钻井技术和管理。但是从风险分析的角度来看，有几个教训需要吸取，如下所述：

- 不考虑严重或显著的意外情况，在良好天气情况下释放传统救生艇证明是成功的；
- 迅速救援海里的人员证明非常重要，即使人员没有受伤、身穿救生服并努力生存；
- 尽管比较暗（可能火灾可以提供足够的光线），在良好天气情况下从未损坏的救生艇中救援人员证明应是标准程序；
- 低估了事故噪声所造成的问题。

4.5　“海洋奥德赛”号钻井平台燃烧井喷
Ocean Oddesey Burning Blowout

“海洋奥德赛”号事故有可用的调查记录（Ireland，1991）。报告的重点是导致发生气体井喷的事件以及无线电报务员的死亡。没有明确论述火灾和爆炸载荷，一些信息是通过推测而不是观察得到。

4.5.1 事件序列
Event Sequence

1988年9月22日的一次海底井喷导致半潜式钻井平台“海洋奥德赛”号发生了严重火灾。平台当时在距离苏格兰阿伯丁约160km的北海福尔玛地区进行钻井作业。

平台正在对气压异常高的一个油层进行钻探,钻井程序是根据安装的特定设备而设计的。井喷前约两个星期没有进行钻探作业,因为平台的气体压力水平一直很高,油井仅仅处于可控状态。调查认为失效的气体监测器掩盖了情况的严重性。当12时钻探深度达到4900m时进行了一次井涌观测。根据公司提供的情况,当时关闭了环形防喷器,重泥浆向下循环至钻杆并通过节流管线返回。据认为节流管线发生了泄漏,气体涌向海面并在平台下爆炸,液压井喷防止器控制系统可能也遭到了破坏。

第一个事件(据报告是一次爆炸)来自泥浆处理模块,说明气体从泥浆中逸出时已经通过某种方式被点燃了。第二个事件(据报告也是一次爆炸)发生于水面下,显示为一个巨大的气泡,说明井喷开始了。井喷后的火灾破坏了月池,影响到底甲板和泥浆泵舱。生活模块也受到严重破坏。火灾持续了10h。倒塌在钻台上的钻杆说明温度达到了500℃,但完好的钻环说明温度没有达到700℃。

进行井涌观测时平台上的67人已处于戒备状态,除了10名主要人员外,其余人员都登上救生艇以防处理井涌时出现问题。据事后报告,救生艇上没有人知道应该做什么,没有得到任何指示,没有进行任何检查,撤离过程完全处于混乱状态。调查认为实际上平台船长并没有意识到发出尖啸声的排出气体是井喷。

3艘救生艇被释放,只有一人在解除卡住的救生艇释放系统时受伤。守备船“诺丁汉森林”号总共救起了38名幸存者。其快速救援艇(只有一艘可用)首先在海上发现了8名被迫跳离平台的幸存者,随后拖曳了一艘漂向火焰的救生艇。这些幸存者最终被转移到在附近作业的移动式离岸钻井平台“塞德雷斯701”号上。两英里外驶来的锚作拖船“英国福尔玛”号救起了另外两艘救生艇上的28人。

一个无线电报务员在事故中死亡。他本已登上救生艇,但在船长的指示下

又返回了报务室。他没有培训过如何使用呼吸设备，否则可能不会因吸入烟雾而死亡。看来存在着通讯问题，他可能没有理解或听见放弃钻井平台的最终指示。

半潜式紧急支援船“斯塔达尔夫”号来到现场帮助控制并扑灭火灾。后来用炸药炸断了锚索并将钻井平台拖离油井。

调查认为安全主管没有经过正规的安全培训，不能胜任其工作。人员在开始平台工作前也没有要求必须具有生存培训证书。

4.5.2　屏障性能 Barrier Performance

油井控制屏障失效超出了本书讨论的范围。预防死亡事故的屏障功能并不完全成功，但如果没有指示那个未经训练的人员离开救生艇，屏障功能本来是可以成功的。这应该是个人为事故。

救援作业成功实施，但抢救海上设施的作业只是部分成功。海上设施被宣布为“推定全损”，但后来进行了修理并改装为浮式火箭发射设施“海洋发射者”号。

屏障性能概述如下：

HL1. 设计用于维持油井系统完整性的屏障功能：失效。

HL2. 设计用于预防起火的屏障功能：失效。

HL3. 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能：不适用。

HL4. 设计用于预防事态加剧的屏障功能：成功(?)。

HL5. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：总体成功，有限失效。

4.5.3　吸取设计教训 Lessons Learned for Design

这起事故没有总结出设计方面的相关教训。

4.5.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

这起事故没有官方报告，可用的文件来自苏格兰高地和群岛县格兰扁区首席司法行政官进行的调查（Ireland，1991）。调查的重点是法律方面，而不是确定在健康、环境与安全范围内需要吸取的教训。主要关注的还是钻井技术和管理。但是从风险分析的角度来看，有几个教训需要吸取，如下所述：

- 不考虑严重或显著的意外情况，在良好天气情况下释放 3 艘传统救生艇证明是成功的。有一人在试图解除卡住的救生艇钩时背部受伤。
- 为防止漂移到火焰，一艘救生艇需要拖离，推测的情况是其发动机失去了动力。
- 在良好天气情况下进行的撤离没有发生死亡事故，唯一的死亡事故是因为没有从生活区撤离并吸入烟雾所致。
- 当天气和光线情况良好时，从没有受到损害的救生艇中救援人员证明是个简单的程序。
- 事故中的噪声是个复杂的因素。

4.6 “布伦特·阿尔法”号平台爆炸 Brent A Explosion

这起事故的说明基于普瑞凡特报告（Vinnem，1998）。

4.6.1 事件序列 Event Sequence

1988 年 7 月 5 日，钢导管架生产平台“布伦特·阿尔法”号的气体压缩模块因法兰衬垫破裂导致气体泄漏。几秒钟内发生起火，产生的爆炸摧毁了两口油

井的轻质包覆层，防火墙上的一扇门被炸飞到 30m 开外。爆炸中有两人受伤，但并不严重。随后发生的火灾持续时间相对比较短，只造成有限的表面破坏。事故在一小时不到的时间内结束。

营运公司进行了彻底调查，发现喷淋系统在气体泄漏时已经启动，可能是烟雾探测器的作用。并进一步推断最有可能的起火源为喷淋水流入不再“防爆”的照明装置导致短路并产生电火花。

经反算，最大过压范围在 0.3～0.4bar 之间。根据目前的知识，这意味着过压可能因喷淋而有所降低，但在相对比较小的模块里，这种效果或许并不大。随后的火灾只持续了大约 45min 时间，没有对气体压缩模块造成很大破坏。

4.6.2　屏障性能 Barrier Performance

这起事故的屏障失效有：

- 由于法兰破裂导致失去控制。法兰破裂的原因不明。
- 预防起火的屏障也失效了，可能是由于防爆设备失效。实际上这次起火也是北海少数几次相对比较确定的设备失效所导致的起火。设备失效的原因不明，应该是防爆的可靠性降低所致。

以下是在“布伦特·阿尔法”号气体泄漏事故中成功实施的屏障：

- 成功实施了限制碳氢化合物排放量的屏障功能；
- 成功实施了预防爆炸和火灾加剧的屏障功能；
- 成功实施了预防死亡事故的屏障功能。

事故开始时类似于“帕玻尔·阿尔法”号的事故（见第 4.7 节）。第 8.1.1 节对两起事故的屏障性能进行了比较。屏障性能概述如下：

HL1. 设计用于维持生产系统完整性的屏障功能：失效。

HL2. 设计用于预防起火的屏障功能：失效。

HL3. 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能：成功。

HL4. 设计用于预防事态加剧的屏障功能:成功。

HL5. 设计用于预防死亡事故的屏障功能:成功。

4.6.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

从这起事故中可得出以下设计方面的教训:

- 经过观察发现平台布局很重要。“布伦特·阿尔法”号上的气体压缩模块位于平台顶部,距离生活区域最远,导致邻近区域事态加剧的可能性最小。
- 沉重的防火墙门被炸飞到30m开外说明事态有加剧的可能。想像一下有着同样冲击力的门出现在“帕玻尔·阿尔法”号下部的气体压缩模块会发生什么,破裂的管道真实地说明了一切(见第4.7.1节的描述)。
- 最初的爆炸以及随后的火灾所造成的破坏比预期小得多。

4.6.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

这起事故开始时同第二天发生的“帕玻尔·阿尔法”号事故非常相似,但结果却大相径庭(见第8.1.1节)! 因而在本书中这是一起引人注目的事故。从风险分析的角度来看,这起事故有一些教训需要吸取,如下所述:

- 最重要的教训就是消防水的可用性,消防水能为设备降温并预防事态加剧。
- 喷淋系统被证实有正面作用和负面作用。如上所述被假定为起火的原因,但也可能部分降低了爆炸造成的最大过压。对于为设备降温及限制破坏确实是有帮助的。
- 两个受伤人员中的一个在起火发生时实际上正在跑向现场试图阻止泄漏。离岸作业经验说明这是非常正常的行为,尽管公司政策要求人员应

直接到庇护区或集合区。而另一方面，生产操作员经常希望确定气体警报是真实的（“确认”）还是错误的，因而更易发生本案例中出现的行为。

4.7 “帕玻尔·阿尔法”号平台爆炸与火灾 Piper A Explosion and Fire

4.7.1 事件序列 Event Sequence

这起事故众所周知，Lord Cullen（1990）的调查对此进行了详尽记录，概述如下。

1988 年 7 月 6 日 22 时不到，气体压缩区的盲法兰发生了气体泄漏，并在几秒钟内起火。经反算，爆炸载荷的过压范围在 0.3～0.4bar 之间。由于事态加剧，最初的爆炸冲击波随后导致了原油火灾。因为正在进行潜水作业，所有消防泵都处于人工模式，所以不能使用消防水进行降温，因而无法阻止事态的进一步恶化。约 20min 后气体立管开始破裂，最初可能每秒溢出几吨气体，导致火灾明显加剧。随后更多的立管发生破裂。

大多数人员应该都在第一次爆炸中幸存，并聚集到生活区，但除了等待，没有得到任何逃生和撤离的进一步指示。在事故的初始阶段不得不放弃报务室后，平台上及与外界的通讯联系遭到了严重破坏。先前的人员应急培训使他们认为可以通过直升机撤离，但考虑到火灾及笼罩在平台周围的烟雾，直升机撤离是完全不可能实施的。

“帕玻尔·阿尔法”号上一共有 166 人在事故中死亡，包括有一个人后来因严重受伤在医院里死亡。据认为大部分人员都在生活区里因吸入烟雾而死亡，在最初事故发生大约 1h 后生活区塌入海中，当时他们仍然在里面。63 名幸存者中的大多数都是从平台跳入海中并被其他船只救起，包括救援船释放的快速救援艇（FRC）。一艘快速救援艇上的两个船员在试图救援平台附近海中的人员时丧命。

4.7.2 屏障性能 Barrier Performance

“帕玻尔·阿尔法”号事故中屏障失效的范围非常大，概述如下：

- 泄漏由多次试图启动正在进行维修的压缩机所致，工作人员不知道下游管道已被切断。这在允许工作（PTW）系统失效时发生，并且这些重要信息并没有同海上设施管理人员共享。
- 预防起火的屏障功能也失效了，导致泄漏起火的原因不明。
- 避免爆炸和火灾加剧的屏障功能未能限制事故的后果。应注意的是因为所有消防泵都处于人工模式，无法使用消防水。这是由于潜水员进入水中而采取的预防措施，但潜水员并未在进水口附近作业，消防泵应该切换到自动模式。
- 通过逃生和撤离预防死亡事故的屏障功能严重失效。

一些屏障失效是由于其不够可靠。而另一方面，如果大型、没有防护的管道长时间受到火灾载荷的影响，任何管道都将无法承受这种情况。实际上失效在对无防护管道进行设计的过程中就产生了，并且在后期也被忽略，当时公司管理层委托进行的研究指出了管道的弱点，但管理层并未采取行动加以纠正。完全无法使用消防水确实大大加速了一些媒体所说的“不断加剧的灾难”。“帕玻尔·阿尔法”号事故中起作用的屏障很少，但确实是有一些的：

- 当各部分被应急切断阀隔离时，隔离泄漏并限制可燃物源的屏障功能开始还是能起作用的。但后来由于事态加剧，这个屏障也失效了。

图 4.2 是一张简图，通过与能够为生活区及其他重要安全设备提供更佳防护的布局进行比较，说明了“帕玻尔·阿尔法”号平台布局的一些问题。图中左边是“帕玻尔·阿尔法”号平台的布局，中央控制室（CCR）邻近气体压缩模块，生活区也在气体压缩模块附近（上方）。

右边的布局中，在气体压缩模块和重要安全设备（比如应急电源和消防供水）之间有公用设施模块作为缓冲。这些系统为生活区提供了进一步缓冲，生

活区也处于平台上比较低的位置。

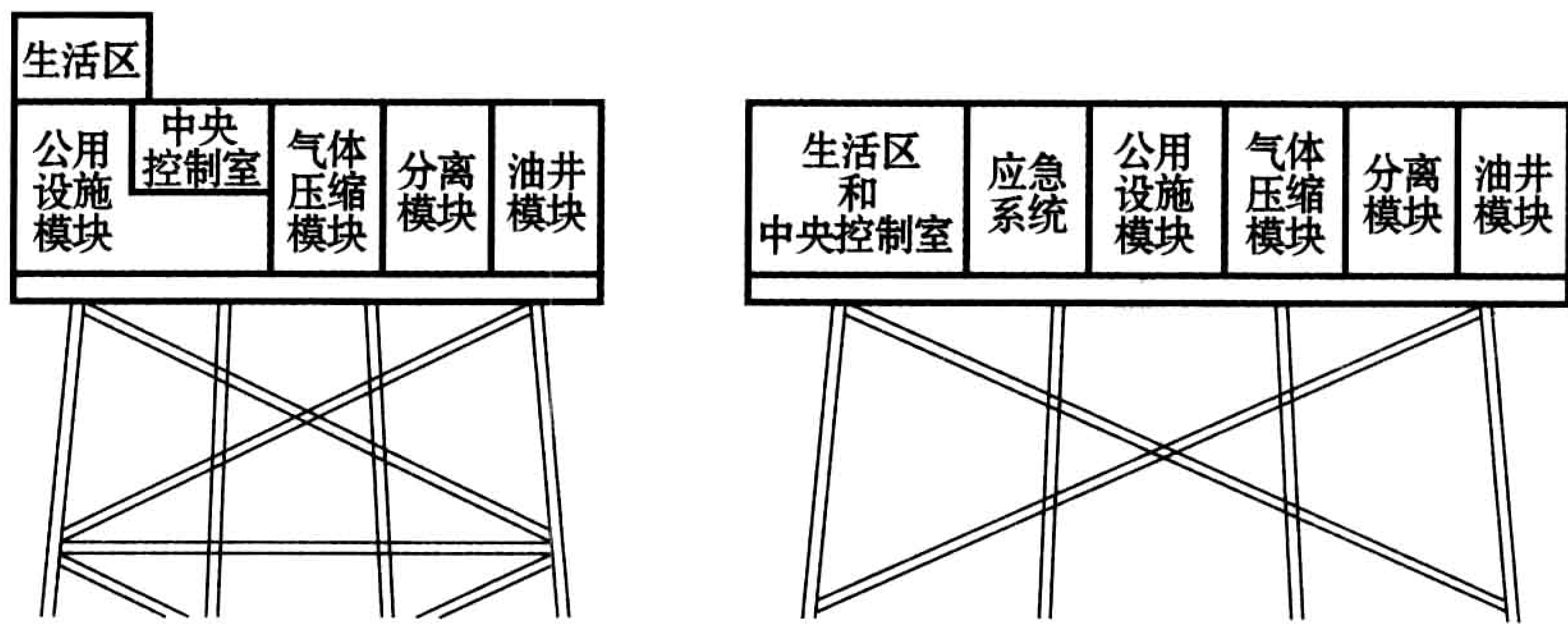


图4.2 对生活区提供比较少和比较多防护的海上设施布局比较

4.7.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

官方报告(Lord Cullen,1990)提供了非常详尽的调查结果和建议。其中一些与设计相关,最重要的有:

- "帕玻尔·阿尔法"号主要区域的布局是造成事故的一个重要因素,即中央控制室、报务室和生活区距离气体压缩区太近,没有得到火灾和爆炸冲击波屏障的保护。
- 防止爆炸和火灾影响加剧的屏障失效是非常严重的失效,如上文所述。
- 生活区位于平台的顶端是烟雾在其中积聚的主要原因。如果生活区在低层甲板,就可以避免被烟雾迅速充满,并至少在事故的初始阶段为通往救生艇所在位置提供更大的可能性。

4.7.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

以下的简短概述基于Lord Cullen(1990),主要关注对分析比较重要的调查结果。

- 最显而易见的教训是当无法使用冷却水时原油火灾的危险性。消防泵没有尽量保持自动模式是平台管理人员犯下的一个严重错误。
- 许多离岸人员一直指望可以通过直升机紧急撤离，这是个非常大的问题。如果不考虑事故产生的烟雾影响，假定(!)在最初气体立管破裂后直升机仍能降落，那么当生活模块塌入海中时还有大约 90～100 人没有得到救援。这还是直升机只需将人员运送到几百米外的移动应急平台，否者情况将更为严重。在大多数情况下，飞往海上最近设施的时间一般都要 10～15min 或者更多。
- 平台上的允许工作系统(PTW)明显严重失效。实际上营运商的健康、环境与安全系统受到了严厉批评。
- 然而，不少人员通过跳入海中得到救援。这类似于“亚历山大·基尔兰德”号事故(见第 4.11.1 节)，不过由于是夏季，“帕玻尔·阿尔法”号发生事故时海水温度要高一些。但对于那些跳入海中的人员而言，海水温度不是问题，因为火灾辐射作为热源是绰绰有余的。

屏障性能概述如下：

HL1. 设计用于维持生产系统完整性的屏障功能：失效。
HL2. 设计用于预防起火的屏障功能：失效。
HL3. 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能：失效。
HL4. 设计用于预防事态加剧的屏障功能：失效。
HL5. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：失效。

4.8 “埃科菲斯克·阿尔法”号平台立管破裂 Ekofisk A Riser Rupture

4.8.1 事件序列 Event Sequence

1975 年 11 月 1 日钢导管架井口平台“埃科菲斯克·阿尔法”号在作业开始

几个月后，其测试立管由于疲劳失效发生破裂。后来发现，失效是因为对浪溅区的腐蚀防护关注不够，导致了迅速腐蚀而造成的。

在平台生活区下方立即发生了泄漏，并导致爆炸和火灾。大火持续时间相对比较短(25min)，因为平台中央控制室很快就切断了立管泄漏的气流。2h 后火灾被完全扑灭。

可能是因为恐慌导致疏忽，一个只载了 6 个人的救生舱从悬挂高度被释放。结果造成 3 人死亡，3 人受伤。其余人员(65 人)在几乎无风无浪的情况下都安全有序地得到撤离。

平台只受到轻微的火灾损害，虽然很明显需要更换一段立管。平台的最大损害是由守备船上高压水枪喷射的消防水冲击造成的。

4.8.2 屏障性能 Barrier Performance

以下是对本起事故造成影响的屏障失效：

- 因严重腐蚀导致立管迅速失去完整性。在安装过程中，立管被一艘船损伤并产生凹陷，因而用新管更换了浪溅区的一段立管。对这段立管提供的腐蚀防护非常表浅，而且当生产开始后因为碳氢化合物温度的升高，腐蚀速度非常快。腐蚀防护的可靠性远远不够。
- 预防起火的屏障功能也失效了，尽管起火源不明。可以注意到平台被气云所笼罩，起火可能发生在一般区域，比如由照明灯引起。这样的话，事故中可能就没有发生任何失效。
- 保护人员的屏障功能部分失效，因为救生舱从 20 多米高度自由下落到海平面而导致人员伤亡。撤离系统的可靠性不够。

以下是在“埃科菲斯克 · 阿尔法”号平台立管破裂及随后的气体爆炸和火灾中成功实施的屏障：

- 通过切断气流来限制泄漏量的屏障功能成功实施。包括关闭特定管线以切断“埃科菲斯克”号平台的可能回流。管线距离和长度都比较短，大约 1km，这也限制了碳氢化合物的蓄积。

- 限制爆炸和火灾加剧的屏障功能成功实施。要指出的是守备船的外部灭火也很成功。

屏障性能概述如下：

HL1. 设计用于维持生产系统完整性的屏障功能：失效。
HL2. 设计用于预防起火的屏障功能：失效。
HL3. 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能：成功。
HL4. 设计用于预防事态加剧的屏障功能：成功。
HL5. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：部分失效。

4.8.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

这起事故没有进行官方调查，只有内部文件报告了调查结果。这是挪威离岸作业发生的第一起重大事故，调查程序可能还未完全建立。以下是可以总结出的教训：

- 生活区正下方的立管位置证明是一个严重问题。火灾立刻就影响到生活区，需要迅速紧急撤离。这可能导致了恐慌，使得救生舱未能有序安全地放下。

4.8.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

就分析重大危险而言，应吸取以下教训：

- 紧急撤离时人员中出现了恐慌现象。但应说明的是这起事故后，撤离培训和练习得到了极大的改善。
- 在良好的天气条件下，通过一个救生舱和一艘工作艇成功撤离了其余的

65 人。

- 爆炸和火灾既没有导致死亡，也没有导致受伤。
- 由于强烈的火灾载荷持续时间比较短，平台只受到有限的火灾损害。

4.9 “左敦”号管线破裂 Jotun Pipeline Rupture

这起事故的介绍基于挪威石油安全管理局（PSA）发布的调查报告概要（PSA，2005a）。

4.9.1 事件序列 Event Sequence

2004 年 8 月 20 日，星期五 11 时 20 分，浮式生产储卸装置“左敦”号 A 井的输气管压力下降，这是约 10km 外的管线破裂所造成的。破裂靠近“左敦”输气管接入“斯塔特帕普”输气管的位置。气体随后流入海中并到达海面。

实际上后来发现发生了两次破裂，第二次破裂由第一次破裂所致，是管道末端大幅度运动的结果。管道两端在事故中变形，因而严重限制了管线的气流。后来经计算气体流量为 60 万 Sm^3/d，而 6inch 管线全开口时的理论最大流量为 5 000 万 Sm^3/d。

压力开始降低后 25min，由于管线中的压力降低太多，“左敦”号平台腿柱管线上的阀门自动关闭。约 14 时一艘船在输气管接入区域附近海面发现气泡。20min 后“左敦”号的生产以可控的方式停止。因为“左敦”输气管在 2.5h 前被关闭，持续的气体泄漏来自“斯塔特帕普”输气管。

使用遥控机器人（ROV）关闭阀门以切断泄漏所需的资源在泄漏发生后约 20h 可投入使用。为确定没有起火危险，必须对海里及海面上的气体浓度进行计算。在最初泄漏大约 24h 后，遥控机器人投入使用。由于缺少必需的资源，关闭阀门的尝试没有成功。

第二天早晨一艘船带来所需的所有工具和资源，并于 8 月 22 日上午 10 时

和10时半关闭了两个阀门。事故的实际安全和环境后果有限，尽管有重大安全隐患。

事故的后果是向大气释放了大量气体，相当于130万Sm^3。直接修理成本大约为1.5亿挪威克朗，此外还包括在修理完成前必须关闭气体运输所造成的收入损失。环境影响有限，包括气体燃烧几个小时及产生的CO_2。

破裂发生时所在区域没有船只。如果有船只在泄漏气体上方的话，可能会发生起火，但不大可能失去浮力。

4.9.2 屏障性能 Barrier Performance

这个案例中唯一失效的屏障是控制失效，如管线破裂。破裂可能是由于事故前3年里捕鱼拖网对特定法兰的反复（至少两次）影响造成的。法兰在安装时没有抛石覆盖，但操作员并未对此进行记录。2001年目视检查的结果也没有记录。2001年的检查后暂停了年度检查，下一次检查安排在2006年。

在输气管接入区域附近对捕鱼活动没有限制，所有海上设施都应适应捕鱼活动，包括拖网。对受损法兰附近的类似法兰在安装过程中进行的风险评估却断定，渔具不会影响没有防护的法兰。

用于切断泄漏并关闭油井（“左敦”号B井）的屏障实施成功。由于泄漏位置远离海上设施，没有涉及到其他屏障。

屏障性能概述如下：

HL1. 设计用于维持生产系统完整性的屏障功能：失效。

HL2. 设计用于预防起火的屏障功能：不适用。

HL3. 设计用于减少污染和溢出规模的屏障功能：不适用。

HL4. 设计用于预防事态加剧的屏障功能：不适用。

HL5. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：不适用。

4.9.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

设计吸取的教训是需要保护海底设施不受渔具的影响。应注意的是在这

个案例中,管线上的类似法兰设计时有意不采用抛石或类似方法加以保护,并且风险评估也断定没有必要进行保护。这起事故说明评估的结论可能是不正确的。

4.9.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

对于海上设施的营运,这起事故中没有特别的教训。可注意的是关于应急管理小组的水下机器人能否在气流和气云中安全自如地操纵而不产生起火危险有着很大的不确定性。

4.10 "深海钻探者"号钻井平台倾覆 Deep Sea Driller Capsize

这起事故的介绍基于撤离方法报告(NPD,1998)及 2004 年的一篇报纸文章(Borrevik and Horve,2004)。

4.10.1 事件序列 Event Sequence

当时钻井平台正在从离岸位置被运送到挪威西海岸(费迪厄,卑尔根市外)的船厂,有两艘船护航,一艘供应船和一艘缺乏足够拖力的改装渔船。当半夜接近海岸时,天气转为暴雨,风力达到飓风级别,钻井平台的发动机无力阻止平台漂向礁石。一个发动机无法使用,而钻井平台的船东拒绝了领航员将平台驶进峡湾的要求。

因缺少设备,无法将拖缆运送到供应船,几次建立拖曳联系的尝试都不成功,钻井平台在 1976 年 3 月 1 日 2 时左右搁浅。实际上供应船当时距离岸边太近了,很快也遇上了问题。

50 名船员集合在直升机坪,等待搜救(SAR)直升机的到来,但直升机一直

没有出现。等待了两小时后，船员不得不释放一艘封闭式救生艇。救生艇的电池已被放电（“没有电”），但船员设法人工发动了引擎。由于天气很暗，礁石十分危险，操纵救生艇极为困难，为了给舵手导航，7个船员不得不坐在艇顶上。

救生艇搁浅时发生倾覆，艇顶上的船员被甩入海中。7个人中只有一个幸存，其余船员都消失在海里。

到达现场的直升机救援了大约20～25人。但救生艇漂入遮蔽水域后，其余船员设法跳向岸边并从海水中爬出上岸。一人被波浪阻挡，但后来抓住了直升机绳索并被带到岸上。

钻井平台搁浅约两个月后得到救援，并被宣布为“推定全损”，但仍然进行了修理，此后称为“拜福德·道尔芬”号并投入营运。

4.10.2 屏障性能 Barrier Performance

这起事故发生于挪威石油作业早期，当时的相关知识远不及现在。一些失效的屏障功能和要素有：

- 在极端天气条件下对沿海岸运送的设施进行操纵所需的足够推进力未能得到确保。
- 没有领航员的指挥，在困难的沿海水域中未能成功操纵海上设施。
- 没有意识到在极端条件下对近岸钻井平台进行导航具有极高的风险等级。
- 在危急情况下协助紧急拖曳钻井平台的必要设备未能得到确保。
- 拖曳过程中大量人员面临危险的情况未能得到避免。

长期以来一直认为允许人员乘坐在封闭式救生艇的顶上是个判断错误，因为发生倾覆时会被甩出艇外。但一段时间后大家承认为了操纵救生艇避开礁石，这么做很重要也很勇敢。

“深海钻探者”号事故中几乎所有失效的屏障都同组织因素有关。

在一定程度上可以说尽管条件极端困难，但除了被甩出救生艇外的船员外，救援所有人员的作业还是成功的，这可能更多是靠运气，但搜救（SAR）直升机上训练有素的人员及附近地区志愿者的无畏努力也很重要。

屏障性能概述如下：

STR1. 设计用于维持结构完整性及海上控制的屏障功能:失效。
STR2. 设计用于预防初始失效事态加剧的屏障功能:失效。
STR3. 设计用于预防全部损失的屏障功能:失效。
STR4. 设计用于预防死亡事故的屏障功能:部分失效。

4.10.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

这起事故吸取的教训主要涉及营运方面。一个教训是为了在可能面临的任何水域对海上设施进行操纵,必须有足够的推进力以及足够的冗余,并且在发生单个失效时仍能航行,比如发动机故障。

“深海钻探者”号事故是能够说明撤离时吊柱释放救生艇弱点的第一个案例。实际上释放救生艇是成功的,但这个屏障因素的弱点还是得到了明确的证实。

4.10.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

这起事故是挪威离岸作业早期重大事故之一,从中可吸取许多教训。最主要的经验是同固定式离岸设备相比,移动式平台在运送过程中的风险等级更高。因而运送过程中的配员水平应尽可能低,只需满足航行和海上作业即可。

4.11 “亚历山大·基尔兰德”号住宿平台倾覆 Alexander L. Kielland Capsize

这是挪威离岸作业中第一次指定正式调查委员会来调查的严重离岸事故,

调查委员会在 1981 年提交了非常详尽的报告(NOU,1981)。报告重点关注失效的原因,但也非常关注撤离和救援作业,并且发现了许多缺点。

4.11.1 事件序列 Event Sequence

1980 年 3 月 27 日半潜式住宿平台“亚历山大·基尔兰德”号在同钢导管架平台“埃科菲斯克·埃达”号架桥连接时发生倾覆。在强风但不是风暴中,住宿平台损失了 5 条腿柱中的一条(包括下端的浮力部分)。

事故开始时是腿柱的一根撑杆因疲劳而断裂,随后导致腿柱上的所有撑杆连续断裂。在调查中发现连接在撑杆上的一个装置的焊接有裂缝,这可能在平台建造时就已经存在。随着时间的推移裂缝逐渐扩大,焊接处只有不到 50%仍然保持连接。

当腿柱松动后,平台几乎立即就产生了严重的倾斜。在最初撑杆断裂后的 20min 内,平台完全倾覆并底朝天漂浮在海上,只有平台桩的底部还能看见。

逃生和撤离杂乱无序,只取得有限的成功。实际上只有一艘救生艇被成功释放,一艘因为倾斜而完全无法使用,其余救生艇在大浪中释放时都撞毁在平台上。最终造成 123 人死亡,89 人受伤。

正式调查报告主要关注腿柱失效的原因,但也非常关注撤离和救援作业,并且发现了许多缺点。

4.11.2 屏障性能 Barrier Performance

这起事故中有许多严重的屏障失效,共同导致了极为严重的后果:

- 用于维持海上设施结构完整性的屏障迅速失效。
- 为安全撤离而提供破损稳性的屏障功能失效。实际上稳性屏障的能力并不能涵盖大多数情况。
- 预防死亡事故的屏障功能严重失效。这些失效可能是由于在大多数情况下不够可靠所致。

这起事故中没有成功实施的屏障。这意味着屏障性能可概述如下：

STR1. 设计用于维持结构完整性及海上控制的屏障功能：失效。
STR2. 设计用于预防初始失效事态加剧的屏障功能：失效。
STR3. 设计用于预防全部损失的屏障功能：失效。
STR4. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：失效。

4.11.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

从事故中可以得出以下教训，并应用于半潜式浮动平台的设计：

- 必须在平台下水前检测出建造过程中产生的裂缝。
- 疲劳裂缝可能扩大，意味着必须在其扩大到临界尺寸前检测到。
- 如果浮式平台产生严重倾斜，为争取时间组织人员并安全撤离，应该有一个最终屏障（比如浮力体积或矫正力）。
- 天气条件恶劣时，传统救生艇不能令人满意。这起事故的经验成为开发离岸应用自由降落救生艇的动力。
- 很显然迅速、大幅倾斜的角度使有序逃生和撤离非常困难。

4.11.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

从风险分析的角度来看，需要吸取的主要教训如下：

- 通过事故认识到在恶劣天气条件下，用传统船只救援救生艇中的幸存者是不可能的。
- 当发现守备船要用一个小时才能赶到事故现场时，其作用和能力受到了质疑。

4.12 “海洋突击者”号钻井平台倾覆 Ocean Ranger Capsize

这起事故的介绍基于加拿大的调查报告(The Royal Commission,1984)。

4.12.1 事件序列 Event Sequence

半潜式移动钻井平台“海洋突击者”号于 1982 年 2 月 15 日在纽芬兰外的加拿大水域倾覆。在强烈的风暴中,位于其中一根平台柱的压载控制室窗户因海浪冲击而破碎。海水进入控制室后,压载阀控制系统发生短路,导致压载阀开始错误运转。

船员不得不切换到手动控制,但可能是没有进行过很好的训练,有时候认为压载阀应该处于关闭位置,而实际上却处于打开位置。同时,也没有为避免横倾角过大而迅速进行足够的矫正。因横倾角过大,而且每个浮箱的末端只有一个压载泵房,平台无法恢复安全状态。横倾角导致抽吸高度很快超过了 10m 的极限值,最下部水箱的水已经无法排除。

由于天气情况恶劣,强风及能见度差使得岸基搜救(SAR)直升机无法进行救援。平台随后在没有得到任何救援的情况下倾覆并沉没。

人员(84 名船员)显然进行了撤离,可能是通过两艘救生艇,虽然具体情况不明,但救生艇至少都被释放,不过只看到了其中一艘。这艘救生艇在尝试将人员转移到守备船甲板时同守备船发生了碰撞。救生艇很快漂离,此后再也没有找到。没有发现任何幸存者或尸体。

4.12.2 屏障失效 Barrier Failures

以下屏障在这起事故中失效:

- 对于控制浮动设备稳性非常关键的压载控制系统，在以下几方面失效：
  - ○ 由于进水和短路，遥控压载系统失效。这说明压载控制系统没有达到应有的可靠性，主要原因是控制室位于平台柱内。
  - ○ 因能力和/或知识不足，手动控制压载阀失效。
- 储备浮力可作为防止倾覆的最后屏障，但设计时并没有提供。

这起事故中没有成功实施的屏障。屏障性能概述如下：

STR1. 设计用于维持结构完整性及海上控制的屏障功能：失效。
STR2. 设计用于预防初始失效事态加剧的屏障功能：失效。
STR3. 设计用于预防全部损失的屏障功能：失效。
STR4. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：失效。

4.12.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

从这起事故中可以吸取许多适用于设计的教训：

- 为了能对无法预料的严重意外情况进行矫正，压载泵需要具有系统柔性。
- 应该为平台提供储备浮力或类似功能作为防止倾覆和沉没的最后屏障。
- 很明显即使在恶劣的天气条件下也能释放传统救生艇（使用了一艘还是两艘未知）。

4.12.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

从这起事故可以吸取一些非常重要的教训，不仅仅是关于营运安全。主要教训如下：

- 当自动系统失效时，为了能进行手动控制，人员能力和培训是非常重要的。
- 没有特殊设备，在恶劣天气情况下通过传统船只从救生艇救援人员几乎是不可能的。

4.13 “爪哇海”号钻井船倾覆 Glomar Java Sea Capsize

这起事故的介绍基于撤离方法报告(NPD,1998)。

4.13.1 事件序列 Event Sequence

1983年10月25日GRT为5930的钻井船“爪哇海”号在南中国海的一次风暴(热带台风“莱克斯”)中倾覆。实际天气情况为风速达到了75kn，浪高12m。后来发现该船底朝天沉没在海南岛以南96km、水深96m的海底。当时“爪哇海”号处于油井上方的锚位上。

1983年10月23日钻井船就针对预报的风暴进行了准备。立管被分离并吊放到船上，但是决定船舶不移动或不撤离船员。后来天气恶化，撤离因过于危险而不能进行。

1983年10月25日20时，该船报告横摇20～30°。23时后，可能因装载的钻杆发生移动，船舶向右舷倾斜15°。另一种说法认为倾斜是由于边舱受损进水所致。船员无法确定原因，试图纠正可能使情况变得更糟。

在强风和大浪的影响下，船只在大约23时50分向右舷倾覆，4个锚毁坏。约23时81名船员集合并穿上救生衣，救生设备包括：

- 船舶两舷各有一艘64人封闭式救生艇，具备两种降落方式及承载释放装置。
- 3艘抛投式充气救生筏，共可乘坐55名船员。

● 船员没有海上救生服，只有救生衣。

右舷救生艇看来已经释放，艇上船员数不明(不超过45人)。左舷救生艇没有释放，但被扯离吊放位置，这可能在船舶沉没时发生。发现一名船员被困在右舷救生艇中，35人被困在生活区中。

钻井船没有守备船。其供应船当时在20mile以外，并在1983年10月26日才到达钻井位置，只发现了残骸。

1983年10月27日收到了救生艇的遇难信号，第二天一架直升机发现其已经倾覆，这艘救生艇没有找到。但后来找到了一艘空的救生艇，没有发现幸存者。

船舶残骸的录像显示，船的中部及右舷有严重的结构损坏。破裂从主甲板沿右舷一直到船底板。事故可能的原因是决定将船用所有9个锚系定在油井位置，这样右舷就承受了风暴对船只的所有影响，当右舷倾斜10°时，严重横摇导致船舶向右舷倾覆。

4.13.2 屏障失效 Barrier Failures

这起事故中以下屏障功能失效：

● 在台风情况下，保护结构完整性免受波浪过载影响失效。
● 在台风情况下，预防死亡事故(通过撤离)失效。

在这个案例中，相关屏障(至少是已知的屏障)都没有得到成功实施。屏障性能概述如下：

STR1. 设计用于维持结构完整性及海上控制的屏障功能：失效。
STR2. 设计用于预防初始失效事态加剧的屏障功能：失效。
STR3. 设计用于预防全部损失的屏障功能：失效。
STR4. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：失效。

4.13.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

这个案例中没有关于设计此类船舶的特别教训。

4.13.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

关于营运浮式海上设施，这起事故中可以吸取的教训如下：

- 当预报有极端天气情况时，应足够早地对海上设施进行撤离。
- 当预报有极端天气情况时，还应对海上设施的安全防护进行考虑。

4.14 “西克雷斯特”号钻井船倾覆 Seacrest Capsize

这起事故的介绍基于撤离方法报告（NPD，1998）。

4.14.1 事件序列 Event Sequence

1989 年 11 月 3 日，钻井船“西克雷斯特”号在台风“盖伊”期间于泰国海湾倾覆。当时风速 90kn，产生的巨浪估计高达 11～14m。台风眼很明显直接经过了“西克雷斯特”号，导致的波浪被描述为“混乱”波浪。台风高潮持续了 15min。台风眼经过后船只发生了倾覆。

总共 97 名船员中，91 人死亡，6 人幸存。钻井船的生活区和一台起重机遭到破坏，随后发生倾覆。调查发现没有对到来的风暴进行足够的警告。这起事故没有更多的信息。

4.15 “西伽马”号生活平台倾覆 West Gamma Capsize

这起事故的介绍基于撤离方法报告(NPD,1998)。

4.15.1 事件序列 Event Sequence

1990 年 8 月 21 日,拥有 518 张床位的三叉戟 II 级自升式生活平台“西伽马”号在北海倾覆。

平台由一艘拖力为 150t 的锚作拖船“诺曼德 · 德罗特”号拖曳。据报告波浪高达 16m,平台横摇和纵摇达 30°,主甲板一直被海浪覆盖。12 时 30 分大浪摧毁了大部分直升机坪,随后拖缆断裂。

船员集合并穿上救生服。由于直升机坪倒塌及平台和腿柱的移动高度达到主甲板以上 120m,直升机撤离已不可能。四周都是破碎波,释放救生艇也过于危险。所以船员们开始时决定留在船上直到天气转好。

甲板上的一艘救生艇脱落,撞坏了通风管并进入舱口,使得海水向下流进机舱。8 月 21 日 1 时,平台倾斜 10°,横摇 5%～8%,并以 4.5kn 的速度漂向海岸。巨浪超过了 10m,主甲板已无法接近。

2 时决定撤离。所有 49 人以五六人为一组用绳连接并从生活区第一层跳入海中。4 艘救援船到达并放出 3 艘快速救援艇(FRC),救援艇以马蹄形定位于平台下风处,这样海中的人员就能漂向救援艇。直升机上的探照灯照亮海面,4 人从攀网爬上支援船,其余人员被快速救援艇救起。船上一条绳索钩在喷水口上,导致一艘快速救援艇倾覆。最后所有 49 人都被救起。

3 时 07 分平台在德国海岸外的叙尔特岛以西 70km 处倾覆于 30m 水中。1994 年迪维伯京斯维肯公司被指定打捞平台部件,打捞工作于 1994 年 5 月开始。平台的两条腿柱被拆下并放在平台边的海床上。平台其余部分被运送到水深 25m 处。

4.15.2 屏障性能
Barrier Performance

以下是这起事故中失效的屏障：

- 在恶劣天气情况下拖曳自升式平台时，未能限制面临危险的人员数量。
- 在恶劣天气情况下拖曳自升式平台时，未能采取保护海上设施的必要预防措施。
- 未能预防事态加剧及船体进水。
- 未能及时为人员提供有组织的撤离。

以下屏障在这起事故中成功实施：

- 在不得不以无法控制的方式进行海上撤离的情况下成功救援了所有人员。应注意到也能作为守备船的拖船并未从海中救出所有人员，必须在丹麦埃斯瓦格特海洋救援服务公司的协助下完成救援行动。

屏障性能概述如下：

STR1. 设计用于维持结构完整性及海上控制的屏障功能：失效。
STR2. 设计用于预防初始失效事态加剧的屏障功能：失效。
STR3. 设计用于预防全部损失的屏障功能：失效。
STR4. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：计划系统失效，临时行动成功。

4.15.3 吸取设计教训
Lessons Learned for Design

设计的教训主要是直升机坪在这种平台上的位置。平台在运送过程中腿柱缩回，如果确定直升机坪位置时没有考虑到这一点，可能对接近直升机造成很大障碍。

如果其他海上设施的结构会导致类似的障碍，当接近已有海上设施时也有相同的限制。

4.15.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

如上所述，具有守备船能力的挪威拖船在使用其快速救援艇（FRC）时遇到困难。主要在于以足够快的速度放下和收回快速救援艇。

用于放下和收回快速救援艇的吊车应尽可能靠近船身中部，这样所需的移动最少。

还证明了必需能够收回乘坐 9 人以上的快速救援艇。

4.16 “挪纳”号穿梭油船碰撞 Norne Shuttle Tanker Collision

这起事故的介绍基于挪威科技大学的报告（Vinnem et al. ,2002）。

4.16.1 事件序列 Event Sequence

事故发生于 2000 年 3 月 5 日，挪威海的一艘穿梭油船在进行串列卸载作业时撞到了浮式生产储卸装置的尾部。这艘拥有 DP2 级动力定位的穿梭油船是第一次执行穿梭油船任务，当时几乎已经完成卸载。二者的正常距离为 80m，发生事故时距离大约 77m。相关艏向分别为：

- 浮式生产储卸装置：250°；
- 穿梭油船：226°。

恶劣的天气导致装载中断并开始吹氮。当软管从穿梭油船送回时，穿梭油

船的位置必须与浮式生产储卸装置保持一致。为此动态定位系统从“风标”模式切换到“自动定位”模式，并发出许多导航指令。

事故发生时船桥上有3个人。船长在操作动态定位系统，指导船长在观察作业，一个下级船员在操作装载系统。指导船长有着长期串列卸载作业的经验。船员对于操作动态定位系统没有任何经验，只接受过很少的培训。

船长发现一个动态定位监测器显示水流增加了1.3～2.9kn。他们对此进行了讨论但没有注意显示每个螺旋桨推力的监测器。自动定位启动约50s时间后，船长注意到两台主机的推力都显示为“红色向前”，穿梭油船获得了很大的前进速度。显示螺旋桨扭矩的模拟指示器证实了这一点。船长于是将动态定位控制切换到“手动”模式和“高增益”，操纵杆推到全速后退位置。速度降低了，但穿梭油船还是撞到了浮式生产储卸装置。

撞击速度为0.6m/s(1.2kn)，撞击能量为31MJ，当时是西北欧水域发生过的最为强烈的碰撞。但浮式生产储卸装置和穿梭油船只受到了轻微的结构损坏。

4.16.2 屏障性能 Barrier Performance

使船只按照要求运动是复杂的操作，如果逐步进行应该更容易实现。软件出现了错误，导致产生错误的运动。

在异常偏离或驶偏情况下避免碰撞的唯一屏障是动力定位操作员的迅速干预。虽然有警报范围，但还是需要动力定位操作员的干预。本案例的屏障失效，可能是由于疏忽或缺乏经验。

向前运动发现得太迟。还应注意没有启动横向推力器以便将穿梭油船的船首推离浮式生产储卸装置的尾部。

对于本案例，没有相关的成功屏障。屏障性能概述如下：

STR1. 设计用于维持结构完整性及海上控制的屏障功能：失效。
STR2. 设计用于预防初始失效事态加剧的屏障功能：成功。
STR3. 设计用于预防全部损失的屏障功能：成功。
STR4. 设计用于预防死亡事故的屏障功能：成功。

4.16.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

应指出船只向前运动是由动态定位软件所致,软件存在必须更正的错误。通过这起事故还发现了动态定位软件其他必须改进的地方。

4.16.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

应注意的是这起事故是在浮式生产储卸船的串列卸载作业经验有限的情况下发生的。许多教训应该吸取,涉及:

- 提高动力定位作业的操作指导;
- 修正警报点和设定点;
- 需要进行动态定位校准;
- 信号干扰需要进行识别和修正;
- 提高船员的卸载作业能力;
- 向船员传授经验;
- 完善操作手册。

4.17 "P-36"号平台倾覆 P-36 Capsize

这起事故的介绍基于巴西国家石油管理局发布的调查报告(ANP,2001)

4.17.1 事件序列 Event Sequence

2001 年 3 月 15 日在巴西坎波斯盆地卡多尔油田发生的"P-36"号平台事故

造成了灾难性的损失，官方对事件序列及起因进行了调查。通过对可能性最大的事故起因的分析，当局确定的关键事件为 2001 年 3 月 14 日开始的左舷船尾应急排水箱抽水作业。原来计划先将水箱中受到废油污染的水抽到平台上接受生产油井油气流的采油管汇，然后再同生产的碳氢化合物一起流到处理厂。但启动水箱抽水泵所遇到的操作困难使油气通过水箱的流送管逆流进入其他水箱（右舷船尾），据推测可能有阀损坏或部分开启。泵在 54min 后启动，减少了碳氢化合物逆流，并将水抽送进右舷船尾水箱。在其他水箱抽水作业开始后约两小时，这个水箱的持续增压导致机械破损，这就是报告为“第一次爆炸”的事件，发生时间为 2001 年 3 月 15 日零时 22 分。

破损水箱及受到类似损坏的管路和其他设备中流出的液体积聚在平台柱第四层隔舱中。气体通过隔舱开口及破损的排气管和放汽管逸出到上层甲板。水箱破损后约 20min 时间，溢出到水箱顶层甲板区域及平台柱附近第二层甲板的气体发生爆炸。这就是发生的“第二次爆炸”，导致平台消防队 11 人死亡。

右舷应急排水箱的机械破损以及随后第四层隔舱海水排水管的破裂导致平台柱进水。当第四层隔舱中的水到达应该已经自动关闭的排气管和放汽管系统调节阀时，由于触发机构失效，水仍然可以通过，导致水进入平台柱下部。

平台柱以及浮箱内的液体导致平台倾斜，由于水不断进入右舷船尾平台柱的压载舱及附近的稳定箱，倾斜不断增加。这些舱室进水是由于前一天为了对稳定箱中一条裂缝的修补进行检查，而打开了椭圆检查口（检查孔）。

为了对水进入受损平台柱所导致的倾斜进行补偿而将海水放入正对面的压载舱。这个措施加速了平台吃水增加的过程，虽然并不希望如此。

受损平台柱、右舷船尾压载舱和附近稳定箱的进水以及人为放入左舷船首舱室的压载水使得持续的浸水更为严重。

应急作业并不认为人员撤离非常重要，只使用了一部吊车和一个人员吊舱来撤离 138 人，撤离工作从 3 月 15 日 1 时 44 分开始，持续了大约 2h30min。当天 6 时 3 分，尝试了所有可用的矫正平台方法后，剩下的应急作业人员放弃了平台。

平台被放弃后，曾进行了几次救援平台的尝试，特别是通过将氮气和压缩空气注入进水的隔舱来排水。但这些方法在保持平台稳定性上并不成功，浸水程度不断增加直至 3 月 20 日 11 时 40 分最终沉没。由于水深达 1360m，没有进行打捞平台的尝试。

4.17.2 屏障性能 Barrier Performance

调查委员会进行的分析确定了不符合规范的几个方面，有关标准操作、维修和项目程序，特别是涉及应急排水箱内的频繁水流、左舷船尾水箱抽水作业以及这些水箱周围危险区域的分类等。

其中最主要的是在平台生产周期的大部分时间内，应急排水箱都存储着大量污水，这不符合生产作业手册。根据这个手册，在正常作业时，水箱必须保持隔离，只能用于从生产管槽中应急抽取大量原油或在紧急情况下存储大量采出水。

因而预防大量水注入水密舱的屏障就被破坏了，而这是避免稳定性或浮力问题的关键措施。此外，涉及标准作业和维修程序的不符合规范的方面如下：

- 人工测量容积的系统误差及应急排水箱中无效的液面指示器；
- 打开的排水容器堵塞使水流入平台设备管槽。

对涉及平台进水的关键事件的分析确定了有关标准操作和维修程序不符合规范的几个方面，主要是不符合水密舱操作程序，水密舱所处的区域对维持平台稳性非常重要。此外，也应强调在平台被完全放弃前为控制进水或排空水箱所采取的措施都是无效的。

调查委员会发现巴西石油公司离岸油气作业的作业管理系统存在缺点。此外，用于重大事故和高风险应急响应方案的应变计划以及为浮动生产平台工程项目提供更好内在保护的标准的审核也需要进行改善。

就所有非关键人员都安全撤离而言，保护人员免受初始事件（“第二次爆炸”）影响的屏障功能得到了成功的实施。在平台倾覆和沉没前，留下尝试挽救平台的人员也全部安全撤离。

屏障性能概述如下：

STR1. 设计用于维持结构完整性及海上控制的屏障功能：失效。

STR2. 设计用于预防初始失效事态加剧的屏障功能：失效。

STR3. 设计用于预防全部损失的屏障功能：失效。

STR4. 设计用于预防死亡事故的屏障功能:部分失效。

4.17.3 吸取设计教训 Lessons Learned for Design

应注意的是本应作为浮力舱的水密舱,其检查孔是打开的,这样就使水进入了这些舱室。应该考虑如何通过设计来预防这些开口在重要时刻不处于打开状态。

4.17.4 吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

关于营运浮式生产设施,本起事故有几个重要教训需要吸取:

- 不应在应急排水箱内频繁抽排水流;
- 不应于平台生产周期的大部分时间内,在应急排水箱里存储大量污水;
- 预防水密舱大量进水的屏障在任何时候都应保持可用。

4.18 "P-34"号平台横倾 P-34 Listing

这起事故的介绍基于周刊的新闻报道(Upstream,2002)。

4.18.1 事件序列 Event Sequence

2002年10月13日巴西石油公司营运的浮式生产储卸装置"P-34"号发生严重横倾,在通过排放压舱水恢复控制前,平台几乎倾覆。

电力故障导致压载阀打开，使平台最大倾斜达到 32°。67 名船员中的 25 人跳入海中，随后被救援船救起。所有人员都在这起事故中幸存。

通过排放压舱水，平台逐渐恢复到垂直状态。没有更多关于这起事故的消息。

4.19　“海洋前卫”号钻井平台锚索事故 Ocean Vanguard Anchor Line Failure

这起事故的介绍基于挪威石油安全管理局发布的调查报告（PSA，2005c）。

4.19.1　事件序列 Event Sequence

2004 年 12 月 14 日 22 时 40 分，半潜式移动钻井平台“海洋前卫”号（以前称为“西部前卫”号，见第 4.4 节）的两条锚索发生故障。两台起锚机（1 号和 2 号）无法控制锚索，锚索以不可控的方式被放出，导致平台在 3～5min 内漂离所在位置 160m，并且倾斜 7～10°。

在大约 10m 巨浪的情况下，两条锚索的制动器几乎同时发生故障，连接的带式制动器失灵。由于已经破损，事故后无法判断制动器是否进行了正确调节。供应商先前建议更换带式制动器，但没有实施。因为没有按程序进行安装，棘爪制动机构失灵。

平台的移动导致钻井立管发生故障，张力系统破裂，海底的井喷防止器永久倾斜 6°，起锚机系统损坏，油井受损。挪威石油安全管理局对这起事故进行了详细的调查（PSA，2005b）。

10 月 14 日 22 时有风速为 60kn 的西南偏西风，浪高 15m。挪威海的这口探边井基本上是在按计划钻探。勘探井几乎已经到达目标深度，但钻井作业暂停了，事故发生时船员正在等待天气转好。

事故发生时立管已经连接到水下井口，无法以足够快的速度断开，因而立管和井口遭受了持续的损害。立管的升沉补偿系统也被破坏。

为补偿失去的锚索而启动了推进器，同时也采取了行动以矫正平台的倾斜。第二天夜里，作为预防措施将 23 名非关键人员通过直升机运送到附近的生产平台上。

事故没有对平台和设备造成更多后果，也没有造成人员伤亡。但就产生的后果而言，事故存在严重的隐患：

- 如果平台在油气层钻井时发生锚索故障，可能会发生井喷；
- 如果通过桥与生产平台进行连接的浮式住宿船发生类似事故，漂移可能导致浮式住宿船和平台发生碰撞，造成严重的结构损坏。

移动平台再次投入作业前不得不拖往岸边进行了几个月的修理。

4.19.2 屏障性能 Barrier Performance

这起事故失效的屏障是 1 号和 2 号起锚机锚索控制功能，随后是海底立管快速断开功能失效。

平台营运已经超过 20 年，起锚机可能已经不在最佳的工作状态。平台实际上在 1985 年经历过一次浅层气井喷，当时的名字是“西部前卫”号（见第 4.4 节）。

快速断开功能也失效了。显然这些设备也很陈旧，但没有预料到已经无法使用。因而这些失效是同样严重的。

挪威石油安全管理局的调查确定了 11 个问题，大多数涉及操作员和平台船东应遵从的管理制度。本质上，这些也是屏障失效，见第 4.19.4 节。

幸运的是许多屏障性能得到了成功的发挥：

- 剩下 6 个锚的锚系及推进器设法保持住了平台的位置；
- 油井控制屏障发挥了作用，虽然井喷防止器损坏，但因为没有钻入油气层，这不是特别严重；
- 保护人员安全的所有行动都按计划发挥了作用。

屏障性能概述如下：

STR1. 设计用于维持结构完整性及海上控制的屏障功能:失效。

STR2. 设计用于预防初始失效事态加剧的屏障功能:成功。

STR3. 设计用于预防全部损失的屏障功能:成功。

STR4. 设计用于预防死亡事故的屏障功能:成功。

4.19.3　吸取设计教训 Lessons Learned for Design

这起事故没有涉及设计方面的特别教训。

4.19.4　吸取营运教训 Lessons Learned for Operation

根据挪威石油安全管理局的调查报告,事故的直接和间接起因如下:

- 直接起因:
  - 带式制动器的抓力小于规定值;
  - 制动器操作不正确。
- 间接起因:
  - 缺乏如何操作第二个制动器的知识;
  - 没有按照程序操作起锚机;
  - 缺乏如何使用起锚机及何时断开起锚机的知识;
  - 起锚机缺乏足够的维护;
  - 没有按照标准和程序断开钻井立管;
  - 对于断开钻井立管,操作员缺乏足够的知识;
  - 人员资质不够;
  - 锚索张力测量不够准确;
  - 天气数据的测量和报告不充分;
  - 操作员确保作业安全实施的职责执行不力。

所有这些起因都是“MO”因素,大部分起因都涉及管理体系。基于调查结

果,禁令通知被发送给操作员和平台船东,平台船东收到后来被证实为禁令的以下通知:

- “勒令钻石离岸公司检查其管理体系及组织以确定潜在不符合规定情况的起因,并制定有约束力的计划,包括预防此类不符合规范情况再次发生拟采取行动的明确时间”。

4.20 “埃克森·瓦尔迪兹”号油船溢油 Exxon Valdez Oil Spill

这起事故的介绍主要基于美国环境保护局发布的信息(EPA,2004)。不同于先前讨论的事故,因为主要危险是环境损害以及对船员的一些危害。

对溢油危险的详细讨论超出了本书的范围,所以就屏障及吸取的教训而言,这起事故的讨论不如前面事故讨论得那么彻底。

4.20.1 事件序列 Event Sequence

1989 年 3 月 23 日 21 时 12 分,“埃克森·瓦尔迪兹”号油船装载着 180 000t 原油从阿拉斯加州瓦尔迪兹起航,船长是约瑟夫·黑兹尔伍德。放下领航员后,油船为躲避浮冰离开出港航道。由于导航问题,3 月 24 日零时 4 分油船在距离瓦尔迪兹仅 40km 的威廉王子峡湾布莱礁搁浅。搁浅撞破了 11 个货舱中的 8 个,4h 内泄漏了 19 000t 原油。当油船于 1989 年 4 月 5 日脱困时已溢出了大约 37 000t 原油,6 600km^{2}美国最好的渔场及附近的原始海岸线被溢油覆盖。有醉驾逮捕记录的黑兹尔伍德船长被指控刑事破坏罪、醉酒驾驶船舶罪、危害他人安全罪以及忽视溢油罪。最后他被判有罪,罚款 51 000 美元以及代替半年监禁的 1 000h 社区服务。

溢油范围及位置偏远使政府和行业减轻事故影响的努力非常困难。油船碰撞礁石后,溢出的原油占所运输 180 000t 原油的 20%。油船搁浅后立即开始

的救援行动使船舶免于沉没，也防止了更多溢油的发生。

维持威廉王子峡湾商业性捕鱼业的脆弱食物链受到了溢油的威胁。同样受到威胁的还有 1 000 万只海岸候鸟和水鸟、数百只海獭以及许多其他物种，比如港湾鼠海豚和海狮以及几种鲸鱼。

根据当地的应变计划，阿里耶斯卡协会最初承担了清除溢油的责任，这个协会代表了在瓦尔迪兹营运的 7 家石油公司，包括埃克森公司。在报告发生溢油后不久，阿里耶斯卡协会在瓦尔迪兹成立了应急联络中心，并在阿拉斯加州安克雷奇另外设立了一个行动中心。海岸警卫队很快到达事故现场，其他政府部门的人员也到达现场提供帮助。为清除溢油尝试了 3 种方法：

- 燃烧；
- 机械清除；
- 化学分散剂。

在溢油早期进行了燃烧清除的尝试。将防火围油栏安装在拖缆上，其两端分别与一艘船连接。两艘船缓慢驶过主要浮油带直至防火围油栏中充满溢油，然后将围油栏拖离浮油带并点燃溢油。因为隔开了一定距离，所以燃烧的溢油不会危及主要浮油带或“埃克森・瓦尔迪兹”号。由于天气不理想，随后没有再尝试燃烧清除溢油。

溢油发生后不久，就开始使用围油栏和撇油设备进行机械清除工作。但溢油后的 24h 里撇油设备还无法投入使用，因为稠密的原油及厚重的海藻会堵塞设备，而修理受损的撇油设备要花费很长时间。因为溢油稠厚，将其从临时储油船转移到更为固定的容器也很困难。持续的恶劣天气也延缓了清理恢复工作。

此外，还尝试使用了化学分散剂。但使用化学分散剂是有争议的。阿里耶斯卡协会在其位于瓦尔迪兹的码头有大约 15 000L 可供使用的化学分散剂，但没有应用设备或飞机。3 月 24 日一家私人公司使用直升机和化学分散剂吊桶开始对溢油进行清除。因为没有足够的波浪作用混合海水中的化学分散剂和原油，现场的海岸警卫队代表断定化学分散剂没有起作用并停止了使用。溢出的大量原油最终污染了超过 320km 海岸线。

4.20.2 屏障失效 Barrier Failures

导致发生大量溢油的主要屏障失效是导航失效，油船因而在威廉王子峡湾的暗礁上搁浅。导航失效是由船长的人为错误(由于饮酒而被怀疑，但没有证实)所导致。可以注意到当导航作为预防船舶事故的屏障时，经常会受到操作员习惯和能力的很大影响。许多灾难、事故和意外事件都是由于船桥上的人为错误所致。

船长据称有酗酒的记录，应该说没有禁止他负责船舶和油船的导航是埃克森公司的组织失误。也可以说明企业的安全文化是有缺点的。

4.21 屏障性能总结 Summary of Barrier Performance

表 4.2、表 4.3 和表 4.4 总结了本章描述的事故和意外事件中主要屏障功能的性能。

表 4.2 井喷屏障性能综述

屏障功能	埃科菲斯克·布拉沃	埃克斯托克	恩绍瓦	西部前卫	海洋奥德赛
HL1. 维持油井系统完整性	失效	失效	失效	失效	失效
HL2. 预防起火	成功	失效	失效	失效	失效
HL3. 减少污染和溢出规模	不适用	不适用	失效	不适用	不适用
HL4. 预防事态加剧	成功	失效	成功	失效	成功(?)
HL5. 预防死亡事故	成功	成功	失效	总体成功，有限失效	总体成功，有限失效

表 4.3　生产和立管泄漏屏障性能综述

屏障功能	布伦特·阿尔法	帕玻尔·阿尔法	埃科菲斯克·阿尔法	左敦 A 井
HL1. 维持油井系统完整性	失效	失效	失效	失效
HL2. 预防起火	失效	失效	失效	不适用
HL3. 减少污染和溢出规模	成功	失效	成功	不适用
HL4. 预防事态加剧	成功	失效	成功	不适用
HL5. 预防死亡事故	成功	失效	部分失效	不适用

表 4.4　海上和结构事故屏障性能综述

屏障功能	深海钻探者	亚历山大·基尔兰德	海洋突击者	爪哇海	西伽马	P-36
STR1. 设计用于维持结构完整性及海上控制的屏障功能	失效	失效	失效	失效	失效	失效
STR2. 设计用于预防初始失效事态加剧的屏障功能	失效	失效	失效	失效	失效	失效
STR3. 设计用于预防全部损失的屏障功能	失效	失效	失效	失效	失效	失效
STR4. 设计用于预防死亡事故的屏障功能	部分失效	失效	失效	失效	计划系统失效	部分失效

第 5 章　量化风险评估法

Methodology for Quantified Risk Assessment

虽然定性方法和定量方法都可以评估风险，本书主要涉及定量方法。因而本章将不明确涵盖定性风险评估和安全审查方法，只对量化风险评估进行概述。随后各章将提供更多的详细内容。

5.1 分析步骤和要素 Analytical Steps and Elements

5.1.1 分析要素 Analytical Elements

挪威石油标准化组织的标准（NORSOK，1998）将“风险分析”定义为“系统识别和描述人员、环境及资产风险的分析”。国际标准化组织的定义（ISO，2002）是“系统地使用信息以识别风险源和适配风险值”。因而量化风险评估关注的重点是：

- 识别适当的危险；
- 描述（包括量化）适用于人员、环境和资产的风险。

风险评估的分析要素是指识别相关危险并评估其产生风险所需的要素。这些要素可以涵盖以下所有或部分内容：

- 识别触发事件；
- 起因分析：
  - 可能起因的定性评价；
  - 为确定某些场景概率的概率分析；
- 后果分析：
  - 涉及事故物理影响的后果载荷；
  - 当设备面临意外载荷时，涉及设备响应的响应分析；

○ 涉及这些载荷和响应发生概率的概率分析；

○ 按照对人员伤亡、对环境和/或资产的损害进行后果量化。

图 5.1 概述了量化风险评估的要素。由于显而易见的原因，有时这张图也被称为“蝶形结图”。

图 5.1 说明了风险评估的主要要素。起点是识别触发事件，然后是起因分析和后果分析。风险评估的应用常可描述为：

- 识别关键事件。
- 粗略后果分析(数量级)。
- 起因分析(定性)。
- 定量起因分析。
- 详细后果分析。
- 风险计算。

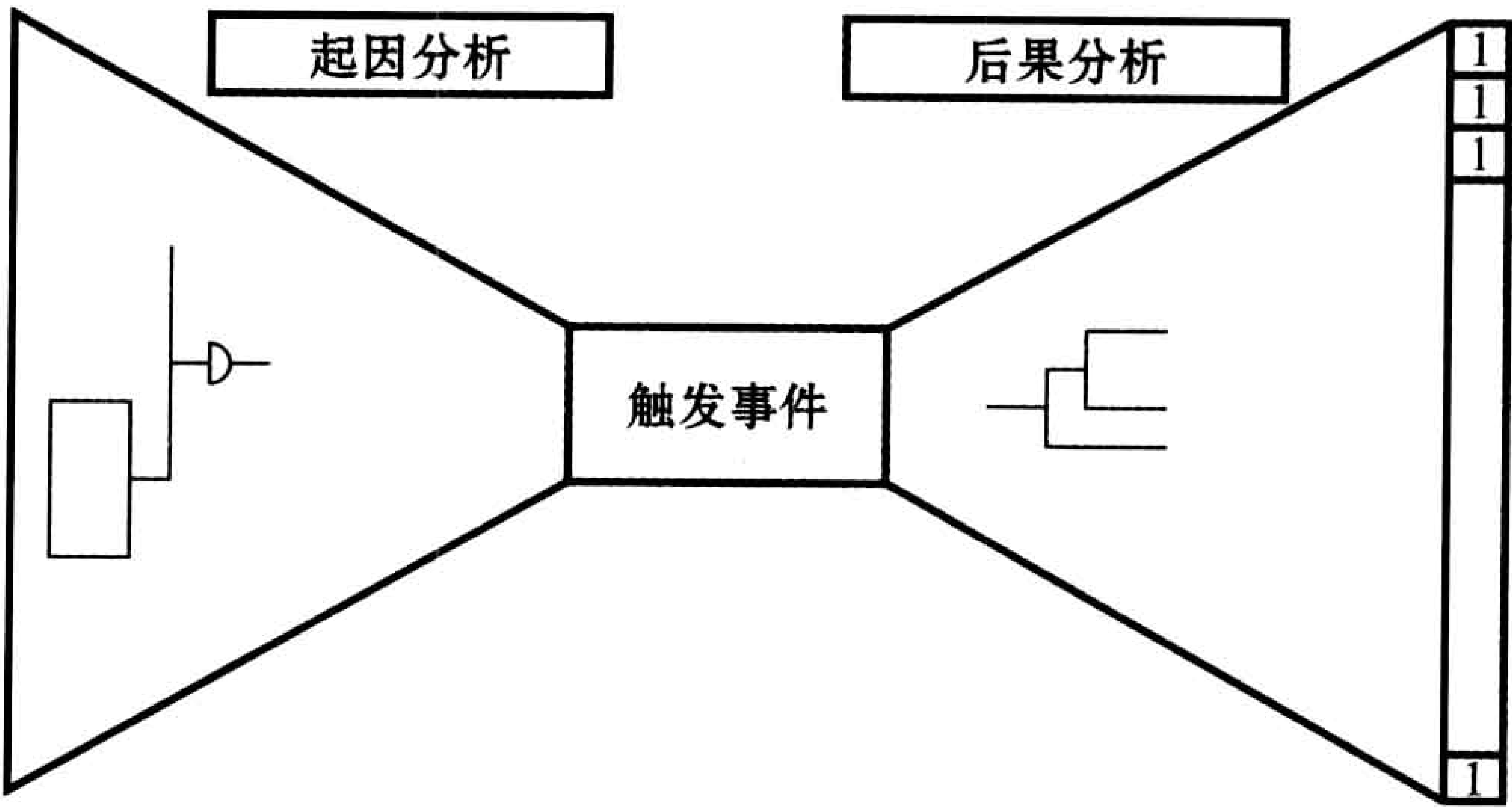


图 5.1　过程风险评估的表达模型

当考虑离岸或海上设备时，后果载荷主要涉及以下方面：

- 碳氢化合物泄漏起火导致的火灾载荷；
- 碳氢化合物气体云团起火导致的爆炸载荷；
- 碰撞、坠落物体等导致的结构性影响；
- 环境载荷。

后果分析涉及许多不同学科的大量工作，涵盖一系列的步骤，包括：

- 可能事件序列的事故场景分析；
- 涉及火灾、爆炸和碰撞等的意外载荷分析；
- 系统和设备对意外载荷的响应分析；
- 对人员、环境和资产的最终后果的分析；
- 事态加剧分析，涉及事故如何从最初发生的设备蔓延到其他设备和区域。

每个步骤都包含了大量工作和建模。本章只是概述，随后的章节将进行详细论述。

5.1.2 识别触发事件 Identification of Initiating Events

触发事件的识别常称为危险识别，缩写为 HAZID。危险识别应包括：

- 概览事故的可能危险和来源，特别强调不能忽略任何相关的危险；
- 为后续分析进行关键危险（和非关键危险）的粗略划分；
- 对用于审核危险的标准进行明确说明；
- 明确记录对非关键危险所进行的评价。

可用于危险识别的正规工具不多，因而以结构化、系统化的方式进行这项工作就非常重要。以下方法可用于进行危险的识别：

- 检查表；
- 事故和失效统计；
- 危险和可操作性（HAZOP）研究；
- 同详细研究进行对比；
- 以前类似项目、概念、系统、设备和作业的经验。

为证明所考虑的事件可以安全地忽略而不影响整体风险情况，对于危险被划分为“非关键”起因进行详细记录就很重要。这可以表述如下：对危险识别进行详细记录必需应用于那些可以忽略的危险。

5.1.3 起因分析 Cause Analysis

识别危险或触发事件很重要，因为它们将是潜在的事故序列的起点。起因分析有两个目的：

- 识别可能导致触发事件的起因的组合；
- 对触发事件的概率进行评估。

第一个目的主要是定性的，而第二个是定量的。以下对两者分别进行论述。

5.1.3.1 定性起因分析技术 Qualitative Cause Analysis Techniques

对起因进行定性分析有时只是分析的第一步，随后再进行定量分析。在有些情况下只进行定性起因分析，因为没有用于定量分析的数据，或出于某些原因不需要进行定量分析。定性分析的目的是：

- 识别可能导致触发事件发生的起因和条件；
- 识别导致触发事件发生的起因和条件组合；
- 为随后可能的定量分析建立基础。

起因分析同传统的可靠性分析有很多地方是相同的，适用的工具也来自于可靠性分析领域。以下分析技术是最常使用的：

- 危险和可操作性分析（HAZOP）；
- 故障树分析（FTA）；
- 初步危险分析（PHA）。

- 失效模式与影响分析(FMEA);
- 人为错误分析技术,比如任务分析和错误模式分析(Kirwan and Ainsworth,1992;Kirwan,1994)。

过去几年里对操作性起因的关注增长非常迅速。因而人为错误分析就显得更为重要(见下文)。

如果可以排除或控制潜在起因,起因识别就能为事故预防提供基础。即使随后并不进行定量分析,定性起因分析也很重要。

5.1.3.2 定量起因分析技术 Quantitative Cause Analysis Techniques

对危险的可能起因的定量分析是为了确定触发事件发生的概率。常用的分析技术如下:

- 故障树分析(FTA);
- 事件树分析(ETA);
- 综合模型;
- 蒙特-卡罗仿真;
- 人为错误定量技术,比如人误率预测技术(THERP)或类似的技术(Kirwan,1994);
- 从历史统计数据对触发事件的频率进行计算;
- 用于碳氢化合物泄漏及后果屏障分析的屏障与营运风险分析法(BORA)。

故障树分析的介绍可见于几本教科书(例子可见 Henley and Kumamoto,1981)。简介参见第 6.2.1 节。第 6.3 节介绍了事件树分析。在第 10 节一个关于综合模型的例子预测了碰撞风险。蒙特-卡罗仿真非常专业,有兴趣的读者可参考 Henley and Kumamoto(1981)。

从历史统计数据对触发事件的频率进行计算实际上是最常使用的方法,虽然是否应该被视为图 5.1 的一种起因分析方法还存在疑问。这种方法目前受到了大量批评,因为其重点只是提供一个数字,而不提供能用于预防事故发生的信息。因而建议不应该像过去那样广泛地应用。这个问题稍后将在本章中

进行论述。在必须进行频率分析的时候，应考虑以下要求：

- 使用的数据必须同相关作业和阶段保持一致；
- 应考虑使用数据的可靠性；
- 数据及使用数据的模型需适合于研究的范围；
- 数据的基础范围必须足够广泛，以便能得出可靠的结论；
- 使用数据应考虑可能的趋势，如果这些趋势能够得到证实。

5.1.4 事故序列建模 Modelling of Accident Sequences

蝶形结图（见图 5.1）的“后果”部分实际上由 3 部分组成：事故序列建模、物理后果（影响）分析以及人员、环境和资产后果的量化。第二部分在下一节论述，第三部分在第 7.3.3 节论述，但仅限于人员后果的量化。使用量化风险评估最重要的挑战是对事故序列建模，涉及这些序列的阶段以及发生时间。虽然认识到目前的工具在这些方面有时远远达不到要求，但仍然在继续使用。推荐的替代方法并不出色，因而没有得到广泛采纳。

如果能够意识到危险，海上设施通常要提供许多屏障以控制危险或缓解危险的影响。这些屏障预防严重事故一般还是足够的。但根据设计基础，屏障是有限制的，可能无法应对最严重的事故情况。事故序列由一系列定义了不同事态加剧可能性的阶段组成。每个阶段通常与可能的功能或所涉及屏障的失效相关。

图 5.2 是屏障概念的图示。图中显示了不同类型的屏障，包括：

- 起因/威胁屏障；
- 后果/缓解屏障；
- 技术（硬件）屏障；
- 程序屏障。

这个例子中的起因屏障只是程序类型，而后果屏障则是技术和程序屏障的结合。

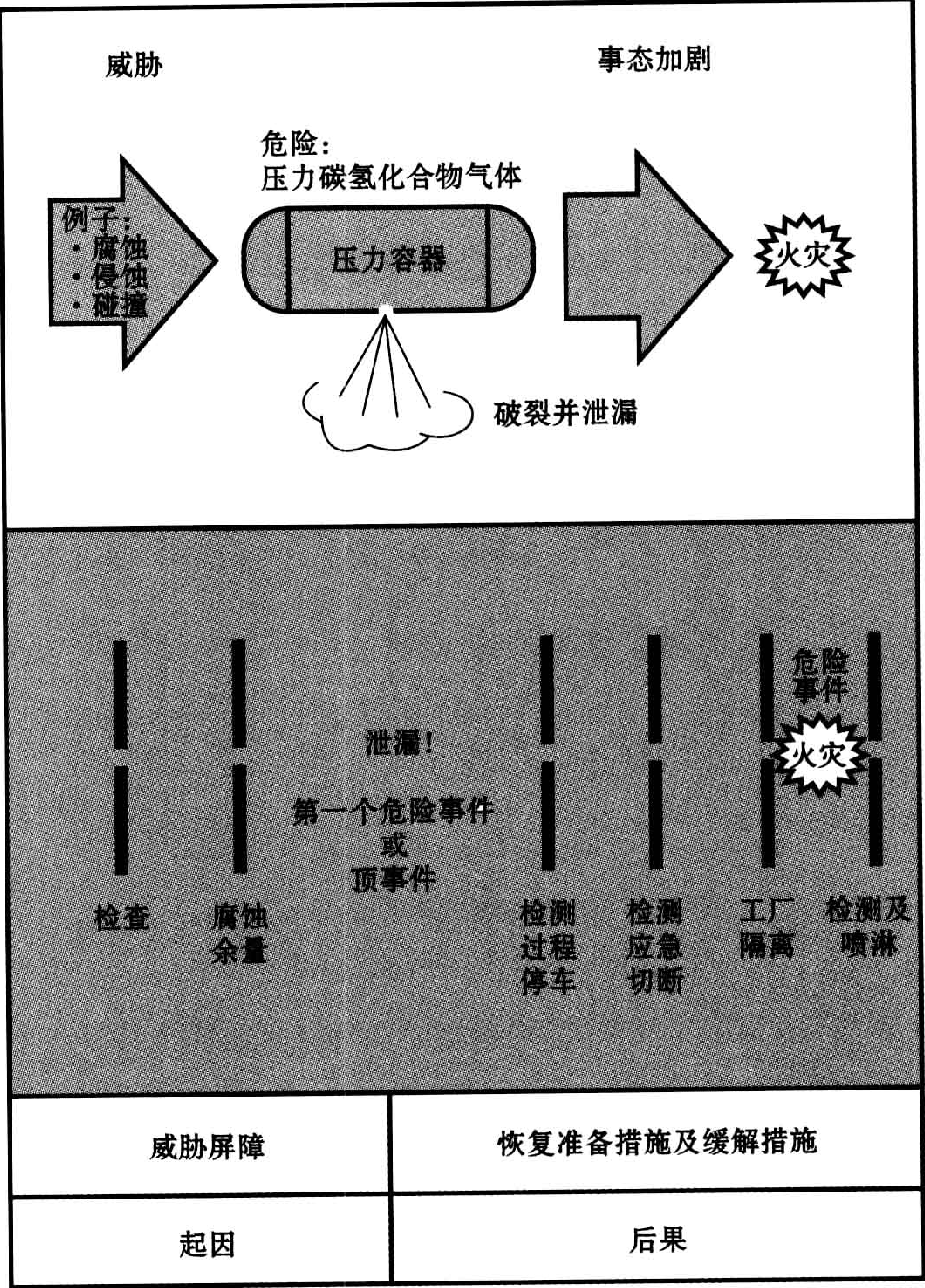


图 5.2　屏障图

下面列出了经常用于事故序列分析的工具。应指出的是第一个方法是目前使用最为广泛的：

- 事件树分析；
- 起因后果图；
- 影响图。

事件树的一个主要缺点在于它是静态结构。但从有时可以发展出“动态树”的角度来说，一些情况下事件树分析可以进一步展开，而树的产生要依靠对后果的计算。在另外一些情况下可以发展出 6 个自由度的“方向树”，以便更好地反映出在不同方向上抵御事态加剧的不同能力。

屏障也可以是程序类型，强调这一点很重要，因为在屏障分析中经常只考虑技术屏障。而强调在事故序列中需要对非技术方面进行考虑也是很重要的。图 5.3 是人为与组织因素（HOF）理想化的示意图。

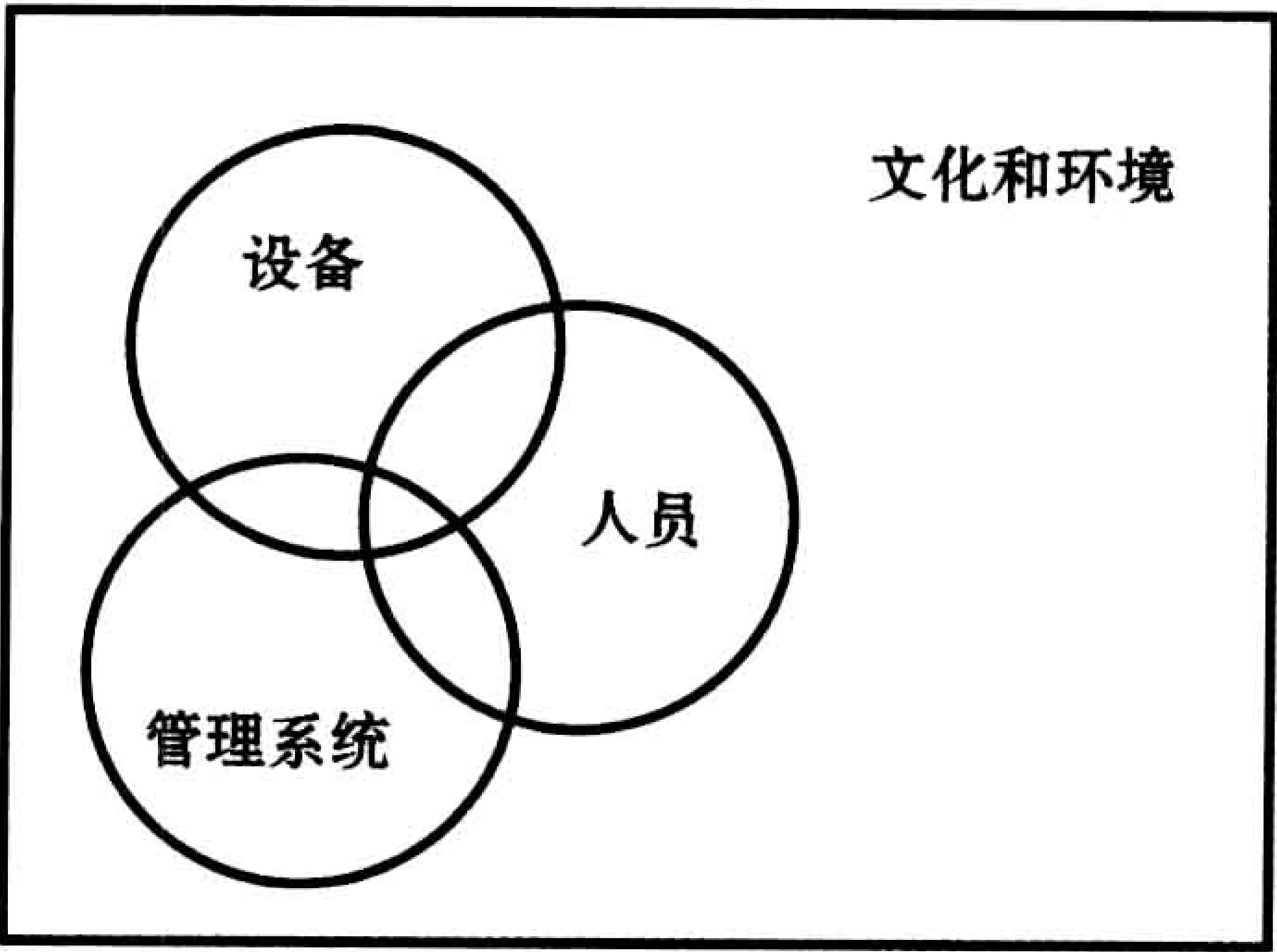


图 5.3　人为与组织因素的概念模型

人、技术和组织（MTO）分析是对事故序列进行建模的另外一种技术，经常应用于事故和意外事件调查。第 6.5.4 节概述了人、技术和组织分析方法。

5.1.5　后果分析 Consequence Analysis

火灾和爆炸后果经常通过一系列计算步骤来进行评估，这对涉及火灾和/或爆炸的所有场景基本都是相同的。主要计算步骤概述如下：

- 生产系统泄漏后的火灾和爆炸；
- 无法控制的井喷后的火灾和爆炸。

表 5.1 概述了火灾和爆炸后果计算的要素。

5.1.6　风险计算、分析和评估 Risk Calculation，Analysis and Assessment

图 5.4 显示了一个迭代循环，说明风险评估作为安全管理过程主要部分的重要性（比如相对于风险接受准则来考虑风险分析的结果）。如果风险分析的结果无法接受，那么就通过实施风险降低措施建立一个新的循环，并对风险分析进行更新以反映这些变化。

表 5.1　火灾和爆炸计算概述

涉及生产泄漏的火灾和爆炸	涉及井喷的火灾和爆炸
● 泄漏率作为少量、中等和大量泄漏的时间函数，泄漏情况分为不造成应急切断、造成应急切断以及造成应急切断和井喷	● 泄漏率作为少量、中等和大量泄漏的时间函数，泄漏情况分为不造成应急切断、造成应急切断以及造成应急切断和井喷
● 计算大量泄漏的外部可燃污染物规模并作为计算起火概率和爆炸过压的基础	● 计算大量泄漏的外部可燃污染物规模并作为计算起火概率和爆炸过压的基础
● 计算起火概率	● 计算起火概率
● 计算气体爆炸过压	● 计算气体爆炸过压
● 计算气体爆炸导致过压超出规定数值的条件概率 ○ 死亡事故 ○ 对设备的损害 ○ 对结构的损害 ○ 对庇护区的损害	● 计算气体爆炸导致过压超出规定数值的条件概率 ○ 死亡事故 ○ 对设备的损害 ○ 对结构的损害 ○ 对庇护区的损害
● 计算备选场景的火灾规模及指定地点的辐射影响，指定地点对事故中人员和安全功能受限是非常重要的	● 计算备选场景的火灾规模及指定地点的辐射影响，指定地点对事故中人员和安全功能受限是非常重要的
● 计算指定地点的烟雾影响，指定地点对事故中人员和安全功能受限是非常重要的	● 计算指定地点的烟雾影响，指定地点对事故中人员和安全功能受限是非常重要的

应注意的是“风险评价”框的两个结果是“不能接受”和“可以接受”。基于的方法是：首先保证与明确的风险接受准则保持一致，然后再进行最低合理可行原则评估。这是图中在“可接受”风险等级情况下需要实施“进一步风险降低措施”的原因。可使用这张图来说明领域内一些主要术语的不同之处：风险计算、风险分析、风险评估以及风险控制/安全管理。以下是这些术语的区别：

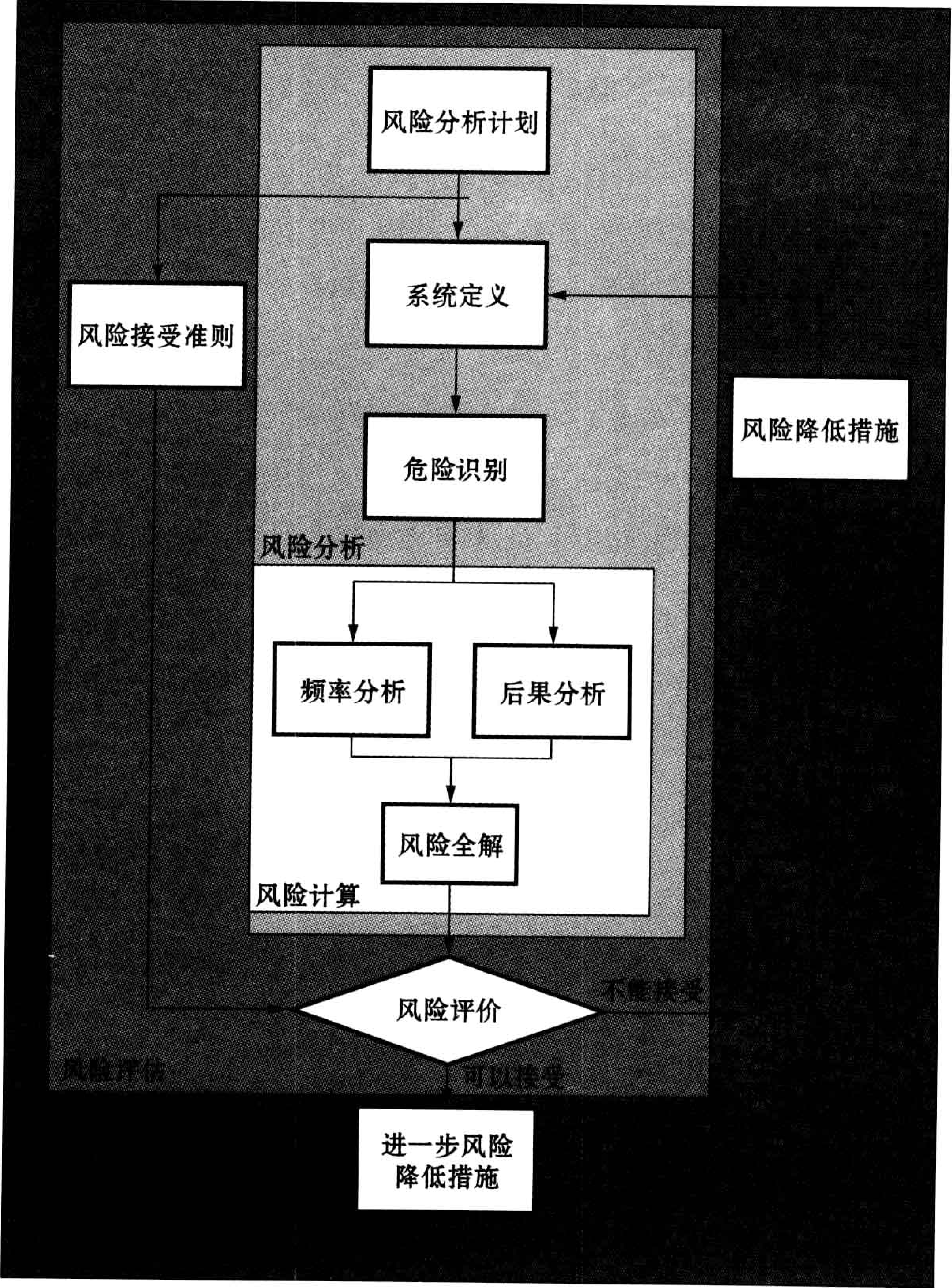


图 5.4 风险评估和风险控制的迭代循环

风险计算	根据频率和后果分析计算风险等级。
风险分析	整个分析过程,包括风险计算。
风险评估	根据风险接受准则对风险进行分析并评估结果的

	整个过程。
风险控制/安全管理	风险评估是总风险控制和安全管理(也常称为健康、环境与安全管理)的工具,考虑各种风险控制方法,包括风险降低措施。

5.2　分析步骤
Analysis Steps

第 5.1 节只是对总体风险分析的主要步骤进行了概述。对于海上设施的量化风险评估,这个模型还需要扩展。图 5.5 介绍了一个实例。图中的主要步骤可分解为更精确、更小的步骤。以下列表说明了评价人员风险的完整量化风险评估的主要步骤及相应研究。危险识别上文已述,本章将论述其余的要素和研究。

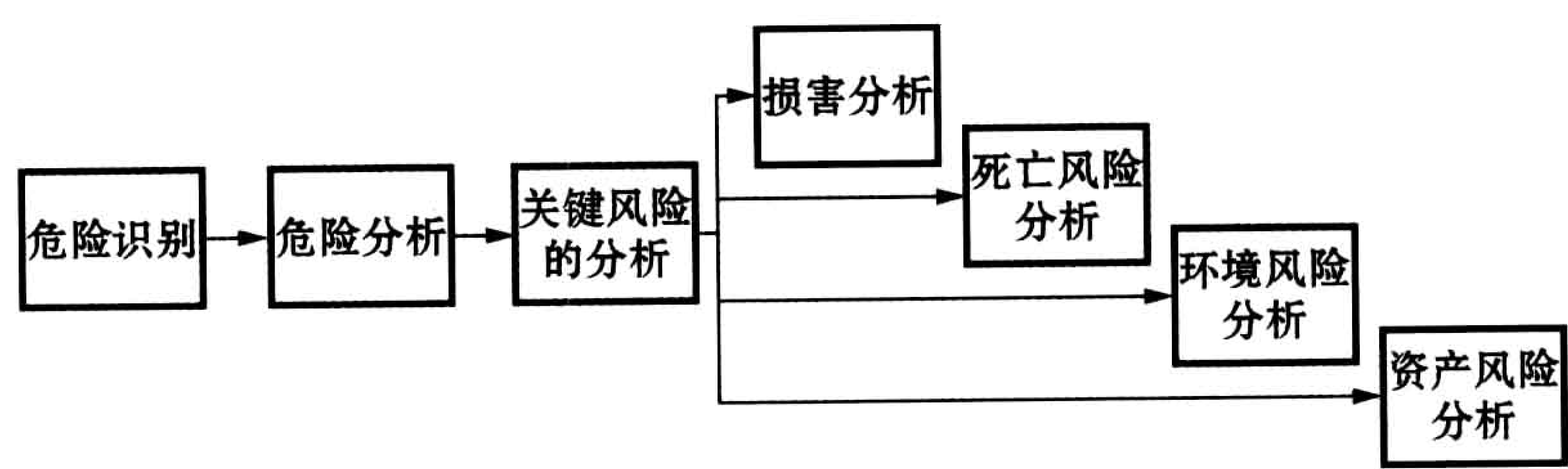


图 5.5　离岸量化风险评估的要素

1）危险识别

　1.1 系统化危险概览

　1.2 顶事件范围

2）危险分析

　2.1 井喷危险研究

　2.2 立管/管线危险研究

　2.3 生产危险研究

2.4 火灾和烟雾分析

2.5 爆炸分析

2.6 坠落物体危险研究

2.7 碰撞危险研究

2.8 结构失效研究

2.9 总体事件树研究

3）关键风险分析

3.1 屏障研究

3.2 详细概率研究

3.3 详细后果研究

3.4 修正事件树研究

4）损害分析

4.1 逃生通道损害研究

4.2 庇护区损害研究

4.3 撤离损害研究

4.4 指挥和控制安全功能损害研究

5）死亡风险分析

5.1 立即死亡风险研究

5.2 逃生通道风险研究

5.3 庇护区风险研究

5.4 撤离方法可用性研究

5.5 撤离风险研究

5.6 打捞和救援风险研究

5.7 所有死亡风险总计

5.2.1 对分析方法的要求 Requirements for Analytical Approach

风险评估应首先从系统描述开始。对所分析系统的准确定义不仅有助于分析师，对于审查或评价研究和结果的人员更为重要。系统描述应包括：

- 描述技术系统、相关活动和营运阶段；
- 说明分析涉及的时间段；
- 说明风险评估涉及的人员类型、外部环境和资产；
- 系统的能力，涉及承受失效的能力及事故对其的影响性。

系统描述的目的在于使分析足够透明，这样其他人员就可以对其进行审查或评价。对量化风险评估研究进行计划的其他要求如下：

- 当进行量化风险评估时，所需采用的数据应尽可能满足研究的目的。选择数据库（当地、国家及国际）及利用相关公司和行业经验时需要考虑到这一点。
- 在决定开始进行量化风险评估前，应仔细考虑可用的数据是否足以得出可靠的结论。
- 基于有限数据的简单比较研究在有些情况下能提供有助于决策的结论。

另一个重要方面是要确保全面记录分析的假设和前提。涉及计算的假设和前提也需要进行记录。此外，应对所有假设和前提进行概括并作为参考资料。

5.3　危险建模和起因分析
Hazard Modelling and Cause Analysis

本节考虑涉及危险建模及触发事件起因的重要相关内容。

5.3.1　井喷危险研究
Blowout Hazard Study

进行井喷危险研究是为了确定在不同阶段涉及不同油井作业的井喷概率。研究还要考虑不同场景下的溢流情况，以确定火灾可能性和污染可能性。

井喷危险研究的输入信息是钻井、完成、生产和维修(缆线、连续管、油井维修等)计划,以及油田、完成技术和设备的关键数据。钻井和其他作业的特定信息可能需要单独考虑,包括在一些情况下对设备和程序进行详细的研究。

对于通常的井喷危险研究方法,存在的意见主要是井喷频率完全基于历史井喷统计数据。这看起来像个"数字魔术",除了产生出数字外没有其他的益处。同时这种也不根据所考虑油井使用的设备和过程进行有针对性的研究。

对井喷危险建模的挑战在于进行能反映实际设备和程序的分析。经常使用的通用模型不能区别不同的平台、系统和营运商。BlowFAM® 方法(Rosenberg and Nielsen,1995)可部分克服这个问题。深入研究可用更详细的方法"Kick-risk"(Andersen,1998;Nilsen et al., 2001)。以下内容应包含在井喷危险分析中:

- 井喷(非环境影响):
  - 对泄漏的可燃物质涉及起火及随后影响的后果进行计算;
- 井喷(涉及环境载荷):
  - 泄漏计算;
  - 泄漏持续时间计算;
  - 溢油漂移计算;
  - 环境影响计算。

5.3.2 生产危险研究 Process Hazard Study

生产系统危险评估要考虑各种生产组件以及在意外泄漏事件中可能出现的不同溢流情况。然后考虑屏障、隔离和区域分类以确定可能发生的不同情形,包括起火和未起火的情况。还要考虑主动和被动安全系统在各种情况下的性能。这些研究的结果输入到用于各种系统、区域和模块的事件树中。生产危险建模本身通常很简单,尽管对生产控制和隔离系统作业的实际建模可能比较困难。

生产危险建模(对立管、管线和井喷危险而言)的关键是起火概率建模。以

下是可燃物质泄漏建模的主要步骤：

- 泄漏频率计算(亦见第 6.6.1 节)；
- 泄漏(量、速率、持续时间等)的计算；
- 泄漏扩散计算；
- 起火可能性计算；
- 火灾载荷计算；
- 爆炸载荷计算；
- 响应计算(有时在单独的研究中进行)。

图 5.6 显示了泄漏速率作为时间函数的典型变化情况，包含了隔离(应急切断)及降压(放空)的影响。第 9 章将对涉及生产系统的危险作进一步论述。

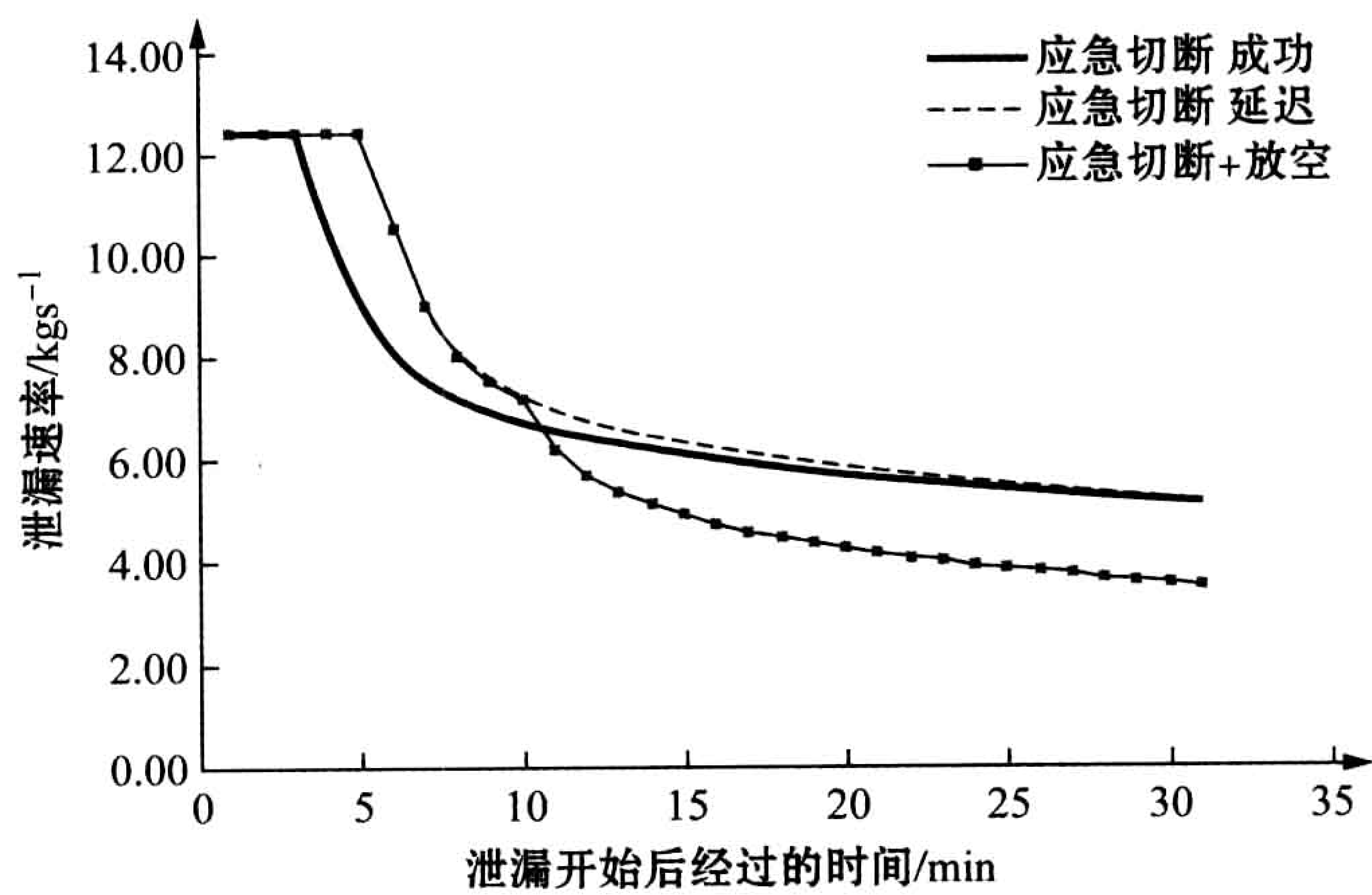


图 5.6　包含和不包含应急切断及放空的流量图示

5.3.3　立管/管线危险研究 Riser/Pipeline Hazard Study

立管或管线泄漏或完全破裂产生的不同流动情况在输入火灾载荷计算时必须进行评估。当泄漏发生在海底时，还必须对气流在水中的特性进行评估。建模的主要问题涉及水下泄漏及泄漏两相和三相流体。

根据横截面和压力，管线或立管完全破裂所导致的气体泄漏在事故的初始阶段可达每秒数吨，这是破坏性的能量释放。图 5.7 显示了立管破裂泄漏速率作为时间函数的典型变化情况。在这种情况下，隔离和降压经常起不到明显的作用。

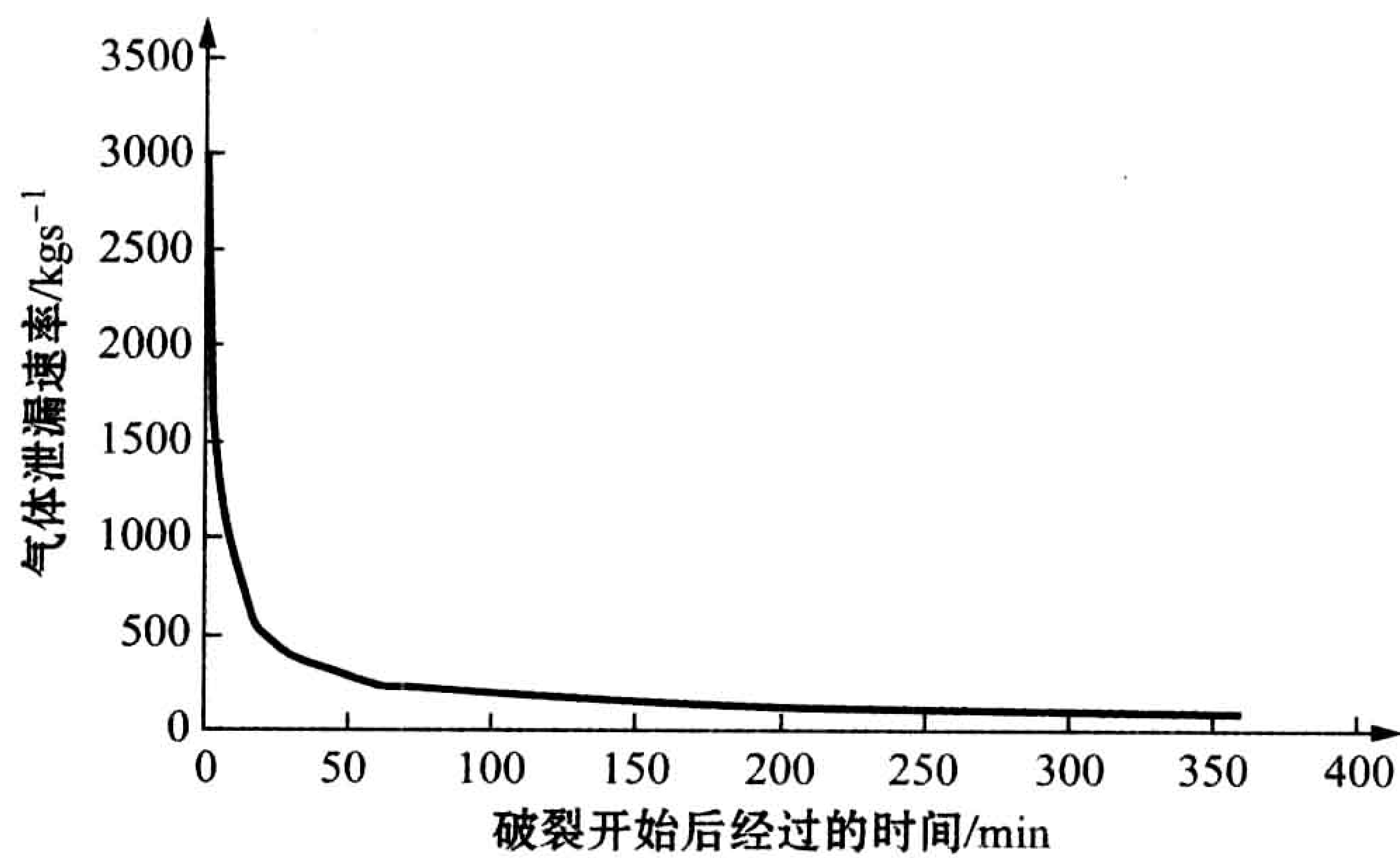


图 5.7 气体立管破裂的流量图示

5.3.4 火灾载荷和烟雾评估 Fire Load and Smoke Assessment

根据模块和系统的情况，火灾载荷评估包括对所有相关火灾场景的考虑。这种评估通常应包含：

- 喷射火；
- 池火；
- 暴燃；
- 燃烧井喷；
- 立管火灾；
- 海面上的火灾；
- 沸腾液体膨胀蒸气爆炸(BLEVE)。

这种评估涉及生产系统的部分将包含对不同生产组件产生的泄漏和溢流

情况的评估。这必需基于生产设备、泄漏源的识别及其特点。

评估也包括产生的所有烟雾及其影响。烟雾对逃生通道和庇护区影响的建模还需要进一步发展。第 8.4 节概述了一些重要的参数。

5.3.5　爆炸载荷评估 Explosion Load Assessment

对于半封闭、封闭以及不封闭爆炸场景，在涉及爆燃的情况下要进行爆炸载荷评估。第 9 章概述了一些重要的参数。

5.3.6　碰撞危险研究 Collision Hazard Study

碰撞危险研究考虑可能与海上设施发生碰撞的不同类型的船舶。应包括：

- 商船；
- 供应船；
- 守备船；
- 穿梭油船；
- 渔船；
- 军舰；
- 潜艇；
- 移动式钻井平台；
- 驳船及其他离岸设施；
- 浮式生产平台。

碰撞评估考虑不同类型的船舶同海上设施发生碰撞的可能性，包括碰撞可能发生的地点，涉及的能量级别以及可能的总体后果。

就可用模型而言，碰撞危险建模可能是最令人满意的领域，尽管还可以进一步提高。对一般外部冲击（碰撞、坠落载荷、直升机坠落在海上设施上）的分析应由以下步骤组成：

- 能量分布计算；
- 载荷分布计算；
- 冲量分布计算；
- 响应计算，包括弹性和塑性响应（也可以在单独的研究中进行）。

第 10 章概述了一些重要的参数。

5.3.7 坠落物体危险研究 Dropped Object Hazard Study

坠落物体危险研究考虑吊车（包括所有起重机）的位置、所处理的载荷以及吊运范围以确定载荷可能的坠落地点。必须考虑 3 种不同的危险机制：

- 载荷坠落于生产设备上，可能导致"失去控制"事件；
- 载荷坠落于浮式平台的浮力舱室上，可能导致浮力临界损失，最坏情况下可导致平台倾覆或沉没；
- 载荷坠落于海底结构及设备上，可能导致海底设备（包括管线）损坏及"失去控制"。

从物理学来看，对物体坠落在水面上方设备和结构的载荷进行建模是相对简单的。但如果部分坠落于水中的话，由于物体同水面的撞击及在水中的轨迹都受到几种更难建模机制的影响，建模就更为复杂。

需要考虑坠落不同阶段的轨迹和速度，特别要注意坠落水中后水流的影响也必须予以考虑。还要考虑到海底设施（基盘、管线等）的强度，结果以坠落概率、碰撞概率和损坏概率进行呈现。这些就构成了总体事件树分析的输入数据。

由于一般不考虑作业程序及吊车防护方面的区别，坠落物体危险评估的可用模型通常都过于简单。

第 12.1 节概述了一些重要的参数。

5.3.8 结构失效研究 Structural Failure Study

结构响应研究涵盖范围广泛的研究，旨在预测构件受到意外载荷时的性能，意外载荷由意外事件所致，比如爆炸、火灾以及极端天气等。当评估火灾对结构的影响时，要确定结构不同部分的温度升高情况（作为时间函数）。进行这些计算有合适的可用软件。基于已经进行的结构分析，有些情况下温度升高后的结构响应可以定性判断。在其他情况下，可能需要进行非线性结构分析。这可以通过特别为此而开发的结构分析软件实现，比如 USFOS®（Amdahl et al.，1995）。第 9 章概述了一些重要的参数。

5.4 临界风险分析 Analysis of Critical Risks

临界风险，如对总风险产生重要影响的那些风险，需要通过对能够提供危险防护的因素进行详细考虑并加以深入分析。下文将对所涉及的工作进行概述。

5.4.1 屏障研究 Barrier Study

对屏障的可靠性、可用性和耐久性进行定性和定量分析，后者常通过故障树分析来实现。

应急系统的可用性和耐久性分析是风险分析的重要步骤，主要涉及碳氢化合物泄漏危险。还应注意的是挪威健康、环境和安全（HES）管理规范要求对屏障进行分析，并且必须了解海上设施作业过程中屏障的状态。此外还要确定关联性，并且如果需要的话，降低屏障之间的关联性。

5.4.1.1 可靠性和可用性研究 Reliability and Availability Study

可靠性和可用性研究通常通过失效模式与影响分析或故障树分析来进行。必须特别重视被称为“共同模式”或“共同起因”失效的可能来源。当备用系统或冗余系统受到相同模式失效的影响而导致所有系统同时失效时，就会发生共同模式失效。共同起因失效是指在其他方面都完全隔离的系统共有一个关键部件，这个关键部件的失效将导致所有系统失效。可能会产生这种影响的典型例子如：有着共同通路的电缆、共同润滑油系统等。

本书的可靠性研究主要涉及屏障性能。为了评估生产或运输的可用性或生产或运输系统的规律性也会进行这种研究。蒙特-卡洛仿真（见 Henley and Kumamoto，1981）是经常使用的方法。

海上设施屏障可靠性研究的范围通常比较有限，对可能存在的关联性进行详尽研究并不适用。为了对屏障及屏障要素之间的关联性进行全面分析，可以使用源于核能风险评估的软件工具 RiskSpectrum（见第 6.4 节），这个工具也可用于海上设施。

5.4.1.2 残存性研究 Survivability Study

进行残存性分析通常是比较困难的。考虑残存性的最简单方式是根据对受到意外载荷影响的系统和设备所进行的评估，这相对比较容易确定。更为完善的方法还要考虑系统如何响应冲击或热载荷。性能下降（如果存在的话）作为时间函数也应考虑。

这种分析很困难，需要对载荷和响应进行非常详细的研究。还必须对大量不同场景进行考虑，场景之间的相对差别可能非常小。

简化评估就是选择稳妥的做法，即保守地对待这些系统的性能及意外载荷。从设计的角度来看是可以接受的，因为留下了设计余量。这种方法在分析中引入了过多的风险预测，可能会影响对风险降低措施的分析。

5.4.2 安全临界系统的评估 Assessment of Safety Critical Systems

安全临界系统的分析或评价是事态加剧分析的重要部分，也可以作为确保

这些系统性能的措施的一部分。

事态加剧分析应至少根据意外事件对安全临界系统的影响对其进行分类。全面的分析需要包含这些系统对于相关意外事件的失效机制及其关联性的识别和分析。重点应该是对整个系统进行分析及将相关失效整合到安全临界系统的分析中。

5.4.3　概率细化研究 Detailed Probability Study

对于涉及事故序列演化的概率，可能需要更为深入的研究。相关的详细建模包括：

- 起火概率；
- 泄漏频率；
- 坠落物体频率；
- 事态加剧概率。

本章随后将主要介绍相关系统的建模。一旦概率研究进行了更新，事件树研究也需要更新。

5.4.4　整合人为与组织因素 HOF Integration

传统上量化风险评估的重点是技术系统和技术能力，对系统其他要素如操作人员和组织因素(HOF)关注就比较少。图 5.3 说明了不同因素之间的关系。过去几年里在英国和挪威都发生了一些变化。浮式生产平台系统广泛使用的趋势说明，在将来为了减少危险并控制风险，营运方面的安全将更为重要。

这个领域近几年来的工作重点主要是“事故后”研究(如 Bea and Moore，1994；Bea，1995)，也进行了一些预测性的工作，如 Kirwan(1994)和 Vinnem and Hauge(1999)。屏障与营运风险分析项目(见第 6.2.6.1 节)开发了一种方法，将操作性起因整合到定量风险评估中，以便在营运场景中改善对风险的控制。

5.4.5 后果细化研究 Detailed Consequence Study

对于关键的风险因素，需要进行更为完善的后果(载荷和响应)分析。比如应该包括以下工作：

- 应用先进的计算流体力学(CFD)技术来计算火灾和/或爆炸载荷；
- 特定方面的物理模型测试，如爆炸载荷；
- 意外载荷的非线性结构响应分析。

5.4.6 修正事件树研究 Revised Event Tree Study

详细的屏障研究、概率和后果研究的结果应反映到事件树中，因而事件树可能也需要进行更新。RiskSpectrum 工具(见第 6.4 节)是进行这种分析非常好的选择。

5.5 不同风险维度的分析 Analysis of Different Risk Dimensions

5.5.1 损害分析 Impairment Analysis

从危险分析和关键风险分析生成的数据随后可以用于涉及不同维度风险的几种研究中。其中最基本的是损害分析(进一步的论述可见第 6.9.6 节)，可以评估安全功能的损害频率。为此通常进行以下研究：

- 逃生通道损害研究；
- 庇护区/临时避难所损害研究；
- 撤离损害研究。

5.5.2 死亡风险分析 Fatality Risk Analysis

使用危险分析和关键风险分析生成数据的另外一种分析是死亡风险分析。为此通常进行以下研究：

- 立即死亡风险研究；
- 逃生通道风险研究；
- 庇护区风险研究；
- 撤离方法可用性研究；
- 撤离风险研究；
- 打捞和救援风险研究；
- 所有死亡风险总计。

第 7 章将论述死亡风险分析。

5.5.3 环境溢出风险的分析 Analysis of Environmental Spill Risk

环境溢出分析的重点通常是原油溢出，虽然有时也考虑泄漏到大气的气体（燃烧或未燃烧）。方法主要是基于对流量（作为时间函数）及可能溢流场景持续时间的评估。对环境溢出风险的详细讨论超出了本书的范围，这里只进行概述，第 6.10 节将做进一步论述，并对环境影响范围的概率分布进行了推导。

对北欧水域溢油进行环境风险分析是风险评估技术相对比较新的应用。在世界其他地方针对环境影响应用风险评估技术要更为成熟，但涉及溢油影响时就未必。

对于溢油导致的海洋环境风险，其分析方法仍然不太成熟，需要进一步发

展。目前环境风险的分析步骤如下：

- 井喷起因分析和井喷频率计算；
- 可选溢油场景分析；
- 扩散分析（溢油漂移仿真）；
- 海岸线影响分析；
- 对有价值生态组分（VEC）的损害分析。

5.5.4 资产风险的分析 Analysis of Asset Risk

对资产风险的分析可涉及以下一或两个方面：

- 涉及设备和结构的损害风险；
- 生产延迟或延期风险。

这些计算一般很简单，是对全部损害成本或作业延迟的主观预测。但也可以对损害和延迟的要素进行详细研究，并基于详细评估对总体影响进行量化。这种方法与用于立即死亡后果详细分析的方法（见第6章）非常类似。

计算总风险常常基于将损害或延迟划分为几种类型，然后对属于这些类型的事件发生频率进行累加。

5.6 敏感性分析 Sensitivity Analysis

如果工作的总体目标是比较替代方案或识别风险降低措施的话，那么大部分量化风险评估研究的主要目的就是进行敏感性分析。计划和执行量化风险评估的一项主要工作应该是在这种情况下完成有效的敏感性研究。已经发现

如果能够重视对研究范围进行详细的定义，敏感性研究将会更为有效和完善。如果对研究进行计划时考虑到敏感性建模，那么建模工作就更有重点。第 15.3 节介绍了敏感性研究的一些例子。

5.7　风险分析的局限性 Limitations of Risk Analysis

当计划量化风险评估研究时需要认识到这种研究是有局限性的，研究中通常应该对风险分析的局限性加以明确说明。符合总体要求的方式也决定了风险分析应用上的局限性。以下方面限制了分析结果的一般适用性：

- 用于量化事故频率或事故起因的相关数据必须有足够广泛的基础。
- 使用的数据通常涉及明确的阶段和作业，因而结果就不能应用于其他阶段和作业。
- 后果和事态加剧建模中的分析深度决定了结果的适用性，通常对于涉及事态加剧分析的系统和功能要进行这样的考虑。比如被动消防建模非常粗略的话，那么研究就不能用来确定什么才是被动消防的最佳选择。虽然看起来这是显而易见的，但未能注意到这种局限性的情况也不少见。

结果的精确性水平不应高于分析中使用的计算、数据和模型的精确性水平。这意味着当基于类型对概率和/或后果进行计算时，风险不能以连续尺度进行表达。

量化风险评估的另一个严重局限性是分析海上设施特定方面的能力。有时认为海上设施的量化风险评估代表以一般方式营运的一般海上设施，但将所考虑海上设施的总体外形和模块布局作为一般设备的总体外形和模块布局。这方面强调了在分析模型中表达特定细节能力（达到能够反映出差别的程度）的重要性。

5.8 软件的使用
Use of Software

有两种类型的软件与风险评估研究相关，一种是对发生的现象进行详细物理/统计学分析的专门软件包，另一种是进行整体研究的软件套件。

许多物理建模步骤都有可用的专门软件包，如气体扩散、火灾建模、爆炸建模以及碰撞建模等。这些软件包的处理范围有限，但对于预测实际载荷、影响和响应可能是非常重要的。

包含了完整功能的软件套件则不同。这些软件套件已经替换了以前使用的基于表格、非常复杂并且难以审查的模型。使用软件套件的主要目的如下：

- 使用固定模型代码（而不是表格）以防误用；
- 标准化数据处理以防错误；
- 数据安全传输，减少文件记录；
- 模型输出和分析之间没有人机界面；
- 记录质量评估过程；
- 模型连接透明，减少文件记录；
- 能够对研究进行有效更新；
- 研究结构的修改独立于代码。

过去 10～15 年里开发了许多软件套件，但都没有成为行业标准，或作为行业所接受的量化风险评估方法。这有些令人惊讶，因为这种标准化已经发生在许多其他领域，比如计算机辅助设计。实际上，几年前标准化的趋势就已经很明显。附录 A 简要介绍了一些主要的软件工具。

5.9 数据源
Data Sources

本节介绍在离岸量化风险评估研究中经常使用的数据源。只对主要的数据源进行介绍,其中大部分都属于公开资源。对于特定主题还时常使用一些报纸、报告等。此外还提供了一些关于数据源使用可用性等的评论。

建模和数据源常常关系密切,因为更为完善的模型需要更为广泛的数据源。勘探与生产论坛数据指南(OGP,1996)在一定程度上重视了这个主题,并对建模进行了概述。

5.9.1 数据源的类型
Types of Data Sources

本节概述的重点是通用数据源,仅为简要涉及公司内部数据源。以下是量化风险评估研究中使用的数据源类型:

- 通用数据源;
- 事故统计数据;
- 失效数据库(失去控制等);
- 设备失效数据库;
- 各种物质的物理属性;
- 公司内部事故和意外事件数据库。

经常可以预料到在特定作业阶段或特定条件下,事故或失效频率要高于平均值。应注意的是目前可用的数据源(及模型)不能区别这种差异。

5.9.2 井喷频率
Blowout Frequency

涉及井喷的相关数据主要如下:

- 取决于所实施作业及油井类型的井喷事故;
- 流动路径及失效类型;
- 流量和持续时间;
- 井喷的起火时间;
- 起火类型(火灾与爆炸)。

表 5.2 介绍了与井喷频率相关的数据源。这些数据源中上述数据的可用性相对较好。但使用井喷数据也有一些问题:

表 5.2 离岸井喷事故数据源

数据源	收录范围	可用性	说 明
WOAD®	世界范围内所有离岸事故	磁盘数据:需要缴纳年许可费	可购买每年两次的统计分析报告
SINTEF 井喷数据库	世界范围内所有井喷事故	磁盘数据:需要缴纳年许可费	成员可以收到年统计分析报告
IFP 井喷数据库	世界范围内所有井喷事故	未知	
MMS 事件文档	美国大陆架发生的所有重大事故,包括溢油	每年两次报告	可通过 WOAD® 获取磁盘数据
离岸井喷起因和控制	世界范围内所有井喷事故	图书,海湾出版社	荷兰,1997 年

- 有关井喷起因的信息非常少,可用于预防事故的信息也很少。
- 为获取足够大的数据基础,所使用数据的范围要大于北海。这有时会导致不能确定发生井喷时在现场作为屏障的是什么设备和程序,因而会发生对井喷风险过度预测的情况。

SINTEF 井喷数据库(SINTEF,1998;Exprosoft,2006)于 1998 年试图对以下情况进行区分:使用了两个屏障、只使用了两个屏障中的一个或其中一个屏障由于某些原因无法使用。

5.9.3 生产系统泄漏频率 Process System Leak Frequency

对于生产组件的泄漏频率,营运商应该有相当多的内部数据,主要是少量

泄漏。有些营运商的数据可用,有些则没有对这种数据进行系统记录。挪威大陆架的所有平台营运商都必须向挪威石油管理局(NPD)报告气体泄漏。而向挪威石油工业协会(OLF)的自愿报告计划也已经实行若干年。但这两个数据收集系统的信息详细程度都不足以用于风险分析。

挪威石油安全管理局(PSA,即以前的挪威石油管理局)从 1996 年 1 月 1 日起开始系统收集碳氢化合物泄漏信息。数据通过风险等级项目的年度报告发布,见 PSA(2006a and b)。2000 年 1 月 1 日后的数据非常详细。

英国健康与安全管理局(HSE,1997b)从 1992 年起实行一项基于所有英国营运商都必须强制进行报告的数据收集计划。这个系统根据“帕玻尔·阿尔法”事故调查的建议而设立,是生产系统泄漏最好的数据源。数据库涵盖所有在英国大陆架上营运的海上设施,包括了泄漏和起火数据以及设备数据。可提供年度统计报告及包含匿名原始数据的磁盘。1997 年对数据进行了统计分析(AEA,1997)。第 5.10 节简要介绍了特定海上设施数据的使用。

5.9.4　立管/管线泄漏频率 Riser/Pipeline Leak Frequency

这个领域公认的数据源就是 AME 围护损失报告(AME,2003),报告更新于 2001 年。有非常多的可用数据,但实施新研究就需要进一步分析数据,并对不同之处进行处理。在过去的几年里报告没有更新。

挪威发生的意外事件每年都发布在风险等级项目报告中(PSA,2006a)。

5.9.5　船舶碰撞 Vessel Collision

J·P·肯尼的研究报告提供了最详尽的北海船舶碰撞信息。这项研究基于英国能源部的档案,现在档案由健康与安全管理局保管。但是,这份报告有点过时了。

健康与安全管理局定期发布关于碰撞事故的研究情况。最新版本发布于 2003 年,数据涵盖到 2001 年(HSE,2003)。健康与安全管理局还发布油船同浮式生产储卸装置(FPSO)船的碰撞事故数据,这是油船处于伴随模式时一种特殊形式的船舶碰撞。

过去10年里发生过几起过往船舶(不考虑穿梭油船)同海上设施碰撞的事故:

- 2002年5月8日上午大约9时35分鱼类加工船“马贝拉”号(总吨为2880GRT)同英国生活平台“拉夫”号发生碰撞。碰撞限于侧面,只对平台造成表面损坏。有着防冰强化船体的加工船船艏吃水线上方遭受了严重破坏,但没有危及生命,加工船可以依靠自身动力返回港口。碰撞发生时因为有雾,能见度不佳,加工船正以全速或接近全速航行,碰撞前没有对平台发出预警,但事故并未导致伤亡。
- 2004年3月7日2时48分载重吨为4 900dwt的供应船“法·辛夫尼”号在挪威北海地区的特罗利油田同移动式钻井平台“西部探险”号发生碰撞。事故发生时供应船以半速航行(7.3kn),没有对平台发出预警。供应船和平台都遭到损坏,但不严重,并能依靠自身动力驶到岸边进行修理。供应船是全新的,钻井平台也是现代化的半潜式平台。老式平台不可能遭受这样的高能量撞击(大约40MJ)而不被严重损坏。供应船处于自动驾驶状态,航线指向平台。当驶入平台周围的安全地带时,船桥上的两个船员未能意识到危险。虽然供应船是伴随平台的,但碰撞场景同过往船舶碰撞有些类似。

另一起影响更大的事故发生于1986年,一艘德国潜艇在水面下与挪威导管架结构油井碰撞,但油井和潜水艇也都只受到轻微损坏。

5.9.6 坠落物体 Falling Objects

涉及坠落物体的最详尽公开数据源是WOAD®(DNV,1998)。但这个数据库只收录了对海上设施造成重大损害的严重坠落载荷事故。近年来也进行过一些“一次性”有限研究,但没有明确而权威的单一数据源。

健康与安全管理局还发布了1980～2003年期间有关生产平台(HSE,2005a)及移动式钻井平台(HSE,2005b)事故和意外事件的综述。

5.9.7　海上事故 Marine Accidents

“海上事故”是指对船舶和非固定式海上设施（半潜式平台、驳船等）的稳性和浮动性造成影响的事故。以下是涉及海上事故的主要数据源：

- 劳埃德一般海运目录，包括海上设施和船舶。伦敦劳埃德船级社有几种提供此类信息的出版物，比如每周伤亡事故报告。
- WOAD®（DNV，1998）收录了涉及船舶及其他浮式海上设施的离岸事故数据。有两种方式可以使用 WOAD®数据库：
  - ○ 统计分析报告，每年发布两次；
  - ○ 电子版本，数据库每年至少更新一次。

健康与安全管理局发布的 1980～2003 年期间有关海上生产设施（HSE，2005a）及移动式钻井平台（HSE，2005b）事故和意外事件的报告也涵盖了海上事故。

5.9.8　设备区事故 Utility Area Accidents

对于涉及设备区的事故，没有权威的单一数据源。这种事故主要是发生于机舱、车间、居住舱等的火灾事故（及其他各种类型的事故）。相关的可用数据源有：

- 风险等级项目年度报告（PSA，2006a 和 b）；
- 健康与安全管理局的移动式钻井平台及海上生产设施报告，见第 5.9.7 节；
- WOAD®（DNV，1998）收录了设备区严重事故的事故数据。

5.9.9　直升机事故 Helicopter Accidents

国家管理机构是直升机事故的最佳统计数据源。英国和挪威民用航空管

理部门都会公布年度统计数据，包括事故、意外事件和飞行小时的详细情况。国际油气生产者协会（OGP）也发布这方面的统计数据。风险等级项目（PSA，2006a）发布了事故和交通量数据。第 3.1.5 节介绍了对可用数据进行的评估。

5.9.10 职业及潜水事故 Occupational and Diving Accidents

对于涉及职业及潜水的事故，没有权威的单一数据源。国家管理机构是这类事故的最佳统计数据源。可用的数据源有：

- 风险等级项目年度报告（PSA，2006a）；
- 健康与安全管理局年度报告。

第 7.8 节对可用数据进行了概述。

5.9.11 起火概率 Ignition Probability

关于起火源和起火概率没有很好的数据源。挪威船级社会时常进行一些涉及起火源的工作（DNV，1981a 和 1993）。

1996～1998 年期间进行了旨在建立起火概率模型的全面研究（DNV，1998b）。这项研究包含了大量数据，包括英国健康与安全管理局关于英国离岸作业泄漏和起火的数据及年度报告。研究在 2005 年和 2006 年进行了更新（Scandpower，2006）。

挪威最后一次发生碳氢化合物泄漏率大于 0.1kg/s 的泄漏起火是在 1992 年 11 月 19 日。英国也发生过几次泄漏起火，最后一次发生油气泄漏率大于 1kg/s 的泄漏起火是 1988 年 7 月 7 日的“帕玻尔·阿尔法”号平台事故，见第 4.7节。

起火数据是最容易获取的，主要涉及井喷起火。但即使是这些数据，所包含的信息也相对比较少，大多限于起火的类型及大致时间。一般不容易找到起火原因、位置等数据。

5.9.12　安全系统可靠性 Safety System Reliability

评估安全系统可靠性没有可用的权威单一数据源。OREDA®(1997)收录了相当多的数据,特别是涉及消防泵、隔离阀等,但关于探测器、控制板等的可用数据非常少。

挪威离岸业协会(OLF)对于应用 IEC 61508 和 61511(IEC,2000 和 IEC,2003)发布了指导准则。指导准则(OLF,2004a)还包含了针对离岸业应用的一些典型的可用性数值。

从 2002 年开始,风险等级项目(PSA,2006a)针对选择的一些屏障要素收集了可用性数据,详见第 5.10.2 节。

5.9.13　可靠性分析的数据源 Data Sources for Reliability Analysis

当没有实际经验数据时,常常可以用安全系统可靠性分析结果来代替。以下数据源收录了可靠性数据:

- OREDA®:离岸可靠性数据手册(OREDA,1997);
- NPRD:非电子元件可靠性数据(Reliability Analysis Centre,1991);
- IEEE 标准 500(IEEE,1984)。

OREDA®只限于离岸应用,而另两个数据源是综合的,不特定于离岸应用。而另一方面 OREDA®传统上比较重视生产系统和设备的可靠性和可用性。第 5.9.12 节所提到的数据源也包含可能相关的数据。

5.9.14　死亡事故建模的数据 Data for Fatality Modelling

用于死亡事故建模的数据包含了用来评估立即死亡事故以及在逃生、撤离和救援过程中发生死亡事故的数据。因职业事故导致的死亡事故也应包括在

内。第 7 章将对这些数据进行论述。

5.10 海上设施特殊数据的使用 Use of Installation Specific Data

5.10.1 一般数据与海上设施特殊数据 Generic Versus Installation Specific Data

这里所讨论的海上设施特殊数据主要是指涉及失效、泄漏等的发生频率数据。安全系统失效的数据通常也是可以利用的。下文论述主要涉及泄漏频率数据,但可以很容易变换为安全系统失效数据。在海上设施作业阶段,风险分析研究中尽量使用海上设施特殊数据是很重要的。这是由于:

- 一般数据的失效率(比如围护损失)通常更高。如果海上设施能在确信合理的程度内显示更低的数值,那么这些数值就可以用来(单独使用或结合一般数据使用)预测更有代表性的(实际上在大多数情况下是更低的)风险等级。
- 使用海上设施特殊数据通常可以使分析工作具有更高的可信度。

为了使数据可信并具有代表性,确保尽可能完整地收集海上设施特殊数据非常重要。因而应检查其完整性,并努力保证不存在缺乏代表性的问题或系统误差。可以通过几种方法来使用海上设施特殊数据,最重要的如下:

- 作为频率计算的唯一数据源;
- 进行频率计算时结合一般数据。

如果有大量的海上设施特殊数据可用(比如有十多种事故数据适用于实际情况),那么这种数据就应单独使用,并足以预测总失效频率。但是对于特殊情

况的影响、不同类型的差别等，仍然应该使用一般数据来进行评估。第 5.10.4 节对这种应用进行了介绍。

5.10.2　源自风险等级项目的海上设施特殊数据 Installation Specific Data from RNNS

针对挪威离岸及岸上石油作业的风险等级项目要求挪威海上设施营运商系统地收集最多为期 10 年(海上设施)的数据。以下是可用的数据：

- 作为时间函数的碳氢化合物泄漏数，并根据泄漏率(kg/s)进行分类；
- 检测中选择的屏障要素作为时间函数的性能数据(失效比例)，见图 5.8；
- 对作为时间函数的集合训练表现进行测定(响应时间)。

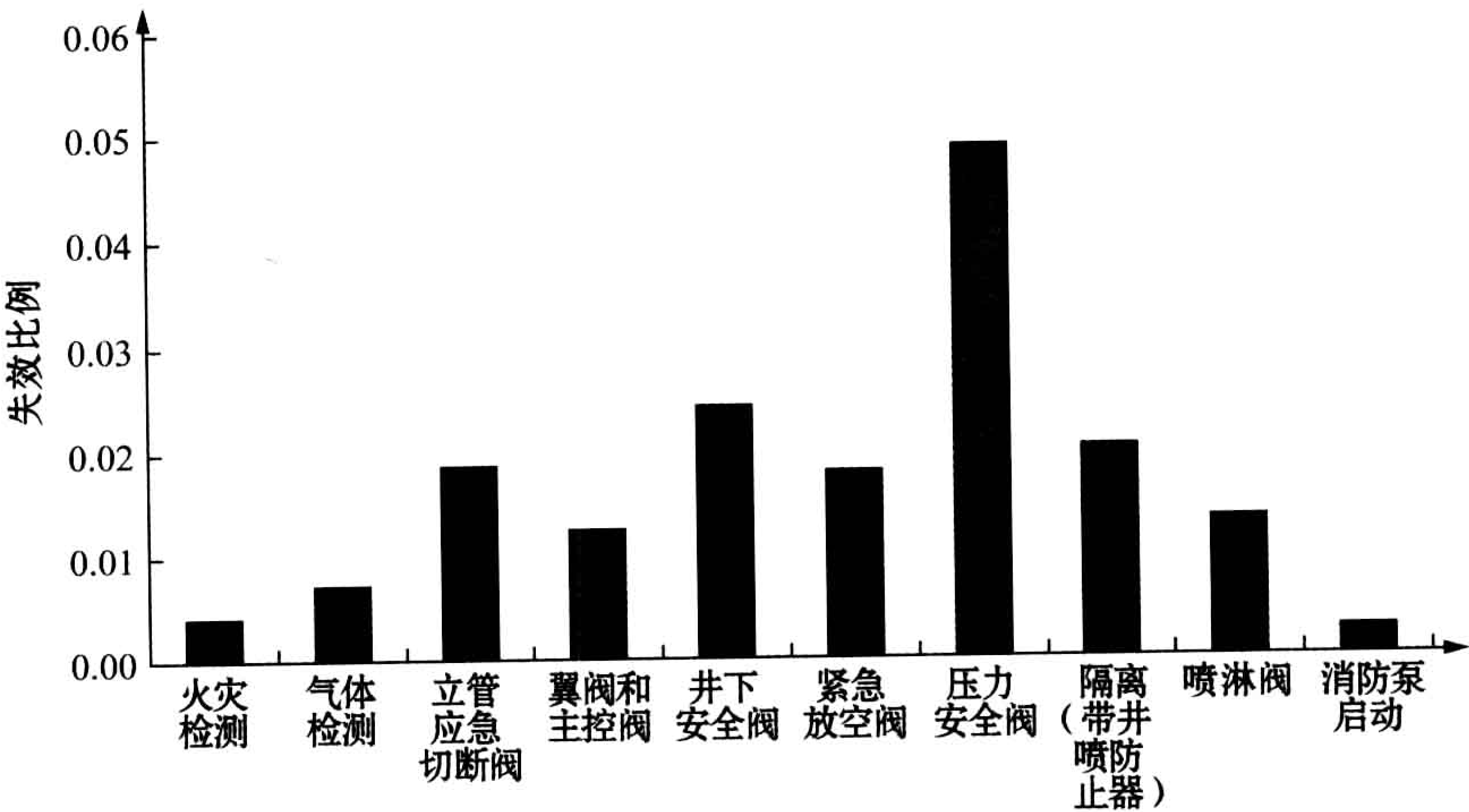


图 5.8　选择的屏障要素失效比例(2005 年)

可用的泄漏数据(围护屏障失效)从 1996 年 1 月 1 日开始；但 2001 年以后的记录更为详细。大多数公司的后果屏障性能数据从 2002 年 1 月 1 日开始，包括以下屏障要素：

- 气体检测器；
- 采油树阀；

- 火灾检测器；
- 立管/管线应急切断阀；
- 井下安全阀；
- 压力安全阀；
- 紧急放空阀；
- 喷淋阀。

在进行或更新风险评估研究时，对于营运中的海上设施更广泛地使用现有数据是一个明显的趋势。

海上设施之间的区别是非常大的。有些海上设施很少失效，所以从其作业中得不到充足的数据。因而就可能需要将特殊数据和一般数据结合起来。

5.10.3 特殊数据与一般数据的结合 Combination of Specific and Generic Data

如果相关对象的特殊数据量不充足，就必须将一般数据与海上设施特殊数据结合起来。进行这种结合的一种公认方法是贝叶斯分析。这种方法根据可用的数据量对一般数据和海上设施特殊数据进行加权并计算出平均数。下面的例子说明了这种方法的使用。

假定有以下数据：

一般数据库

ag——事故发生数

bg——全体人员的工时数

海上设施特殊数据库

α——事故发生数

β——全体人员的工时数

此例中，假定可以应用随机失效模型，比如假定失效符合泊松分布并且失效率 λ 是恒定的。可以使用可用数据对 λ 进行预测，于是可计算出以下发生率数值：

一般频率：

$$\lambda_{\text{generic}} = \frac{a_g}{b_g} \tag{5.1}$$

海上设施特殊频率：

$$\lambda_{\text{install}} = \frac{\alpha}{\beta} \tag{5.2}$$

加权(结合)频率:

$$\lambda_{\text{weighted}} = \frac{\alpha + a_g}{\beta + b_g} \tag{5.3}$$

依据如下:先验值和后验值是泊松分布的预期值,而预测区间可使用卡方分布来表达。这意味着预测区间的宽度同自由度数的倒数成正比,比如当观察数增加时,自由度增加,置信区间的宽度也就增加。这样由于数据基础范围的原因,加权频率的置信区间将为最小。

涉及使用工厂特殊数据时有几个困难,最大的困难通常是缺乏足够详细的可用事故数据。营运商一般对自身海上设施的观察数都比较少,但常常可以通过与相关人员交谈获取更多的细节。比如对于泄漏事故,必须寻找关于泄漏率的数据,这在事故发生时可能没有进行明确的记录。

在任何情况下泄漏率本身常常是无法直接获取的,因而要使用间接观察来对泄漏率进行反向计算。比如对于未起火的气体泄漏,如果气体探测记录中可以找到相关的数据,就可以通过泄漏源的压力和气体云的规模计算出泄漏率。

5.10.4　实例,数据结合 Example, Combination of Data

可以通过一个简单的例子来说明海上设施特殊数据的使用。假定以下是某类型阀门的一般气体泄漏数据:

阀门若干年内报告的泄漏量:3 724

报告泄漏数:

0.1～1kg/s	25
1～10kg/s	3
>0kg/s	1

在一般数据库中,通常根本不报告小于一定限度的泄漏,或报告得不完整。这就导致观察数据不是很有用处。内部平台特殊数据库的数据常常更加有限,一般只记录了少量泄漏的情况。假定以下是平台特殊观察数据:

阀门若干年内报告的泄漏量:455

报告泄漏数:

<0.1kg/s	36
0.1~1kg/s	2

首先计算一般数据集和平台特殊数据集的泄漏频率,如表 5.3 所示。

表 5.3 阀门一般泄漏率和平台特殊泄漏率的传统计算

泄漏率类型	失效率数值(每阀门每年)	
	一般数据	平台特殊数据
0.1~1kg/s	$6.7 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$
1~10kg/s	$8.1 \cdot 10^{-4}$	0
>0kg/s	$2.7 \cdot 10^{-4}$	0

这是典型的情况,因为对于唯一能进行比较的泄漏类型,最低泄漏率是平台特殊泄漏率,要比一般泄漏率低一些(这里是低 35%),但构成计算基础的观察数却大相径庭。如果考虑置信区间的话就更为明显,如图 5.9 所示。

一般数据的预测区间上限和下限比是 1.66∶1,而平台特殊数据的对应值是 4.8∶1(90%预测区间的对应值分别是 1.92 和 7.7)。

图 5.9 显示了平均预测频率以及一般泄漏频率、平台特殊泄漏频率和结合(贝叶斯)频率的区间。区间为 80%预测区间,意味着如果营运条件没有变化,将来观察值有 80%的概率落在这个区间内。

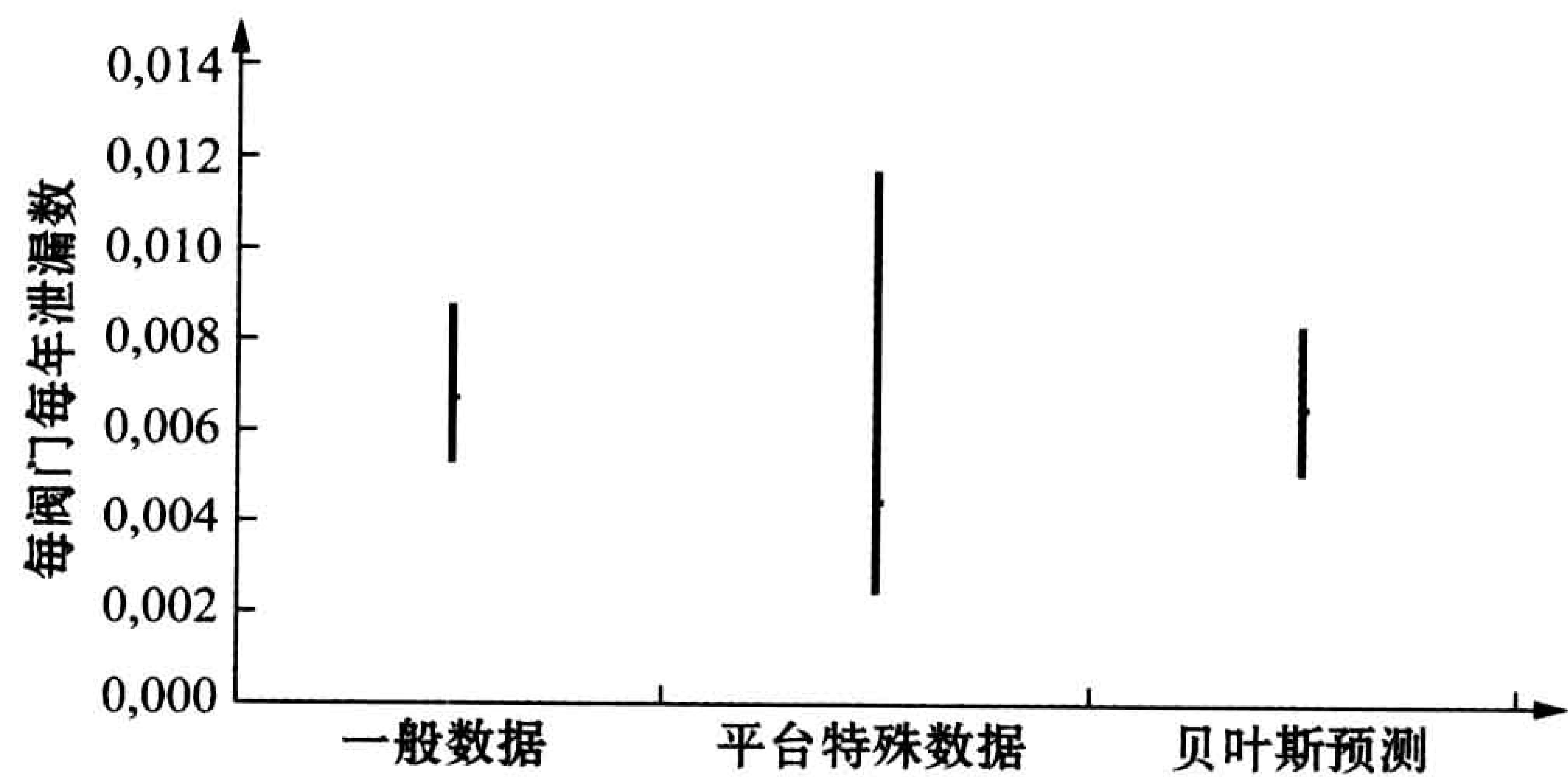


图 5.9 几种可选泄漏率计算的预测区间(80%)

下一步根据贝叶斯方法来考虑混合数据集，依据方程式 5.3 可预测如下：

阀门若干年内报告的泄漏量：

$$3\,724+455=4\,179$$

报告泄漏数：

0.1～1kg/s　　25+2=27

1～10kg/s　　3+0=3

>10kg/s　　1+0=1

这样就有了根据式 5.3 来计算结合频率的数据基础。结果见表 5.4，为方便比较，仍然列出了一般泄漏率和平台特殊泄漏率计算的数值。

贝叶斯方法还为数据记录期间平台上没有发生过的泄漏类型计算出调整后的一般泄漏率。本例中一般泄漏率的降低非常有限，反映出平台上发生的泄漏数很少，因而统计显著性有限。

表 5.4　阀门一般泄漏率和平台特殊泄漏率的传统预测

泄漏率类型	失效率(每阀门每年)		
	贝叶斯预测	一般数据	平台特殊数据
0.1～1kg/s	$6.5 \cdot 10^{-3}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$
1～10kg/s	$7.2 \cdot 10^{-4}$	$8.1 \cdot 10^{-4}$	0
>10kg/s	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$2.7 \cdot 10^{-4}$	0

5.10.5　海上设施特殊数据的数据源 Data Sources for Installation Specific Data

5.10.5.1　概述 Overview

利用已有的海上设施特殊数据源非常重要。通常记录的经验数据非常多，应该首先加以使用。而将来要在可用资源里收集额外的数据可能会更困难。以下是数据源的综述：

- 气体和液体泄漏事故；
- 吊车移动，吊运越过生产区域；
- 高温作业活动记录；
- 气体、火灾和烟雾探测器的检查及检测数据；
- 应急切断阀检测数据；
- 井下安全阀(DHSV)检测数据；
- 喷淋控制阀的检查及检测数据；
- 消防泵检测数据；
- 消防泵停机记录；
- 人员受伤统计数据；
- 过往船舶航线。

为确保收集的数据能用于创建风险评估的输入信息，有时需要修改现有的数据记录方案。并且为了能向挪威风险等级项目报告屏障要素的失效数据，这必须由几个营运商共同来实施。

由于无法观察到一个系统所有主要组件的数据，上述数据源有时会被认为适用性有限。比如考虑一个紧急停车系统，整个系统由探测器单元、电缆线路、信号处理单元、软件、输出信号转换和处理、仪器电源以及应急切断阀组成。所有单元只有传感器(探测器)和应急切断阀是定期检测的，并能提供相关的数据。但这不应妨碍对这些数据源的使用。虽然不能提供所有可使用的数据，但确实能提供一些最关键的数据。也可以认为这些数据源提供的输入信息是涉及对系统可用性影响最大的那些要素。

5.10.5.2 例子 Example

表 5.5 是一个典型的例子，列出了可用于海上设施喷淋控制阀的检测数据。每隔 6 个月或 12 个月时间会对每个阀门进行检测，并提供了表中所显示的数据。一年中共进行了 118 次检测，说明每个阀门都检测过一次。假定 4 次检测发现失效，说明一年的平均可用性为 96.6%。使用了不同的时间间隔对数据进行平均，比如 3 个月或 12 个月时间。图 5.10 显示了检测数和失效数，以及 3 个月累积平均值和年累积平均值。

表 5.5 喷淋控制阀测试数据概览

周数	测试数	失效数
8	22	1
17	15	0
24	35	2
34	27	1
45	19	0
总计	118	4
平均可操作性		98.3%

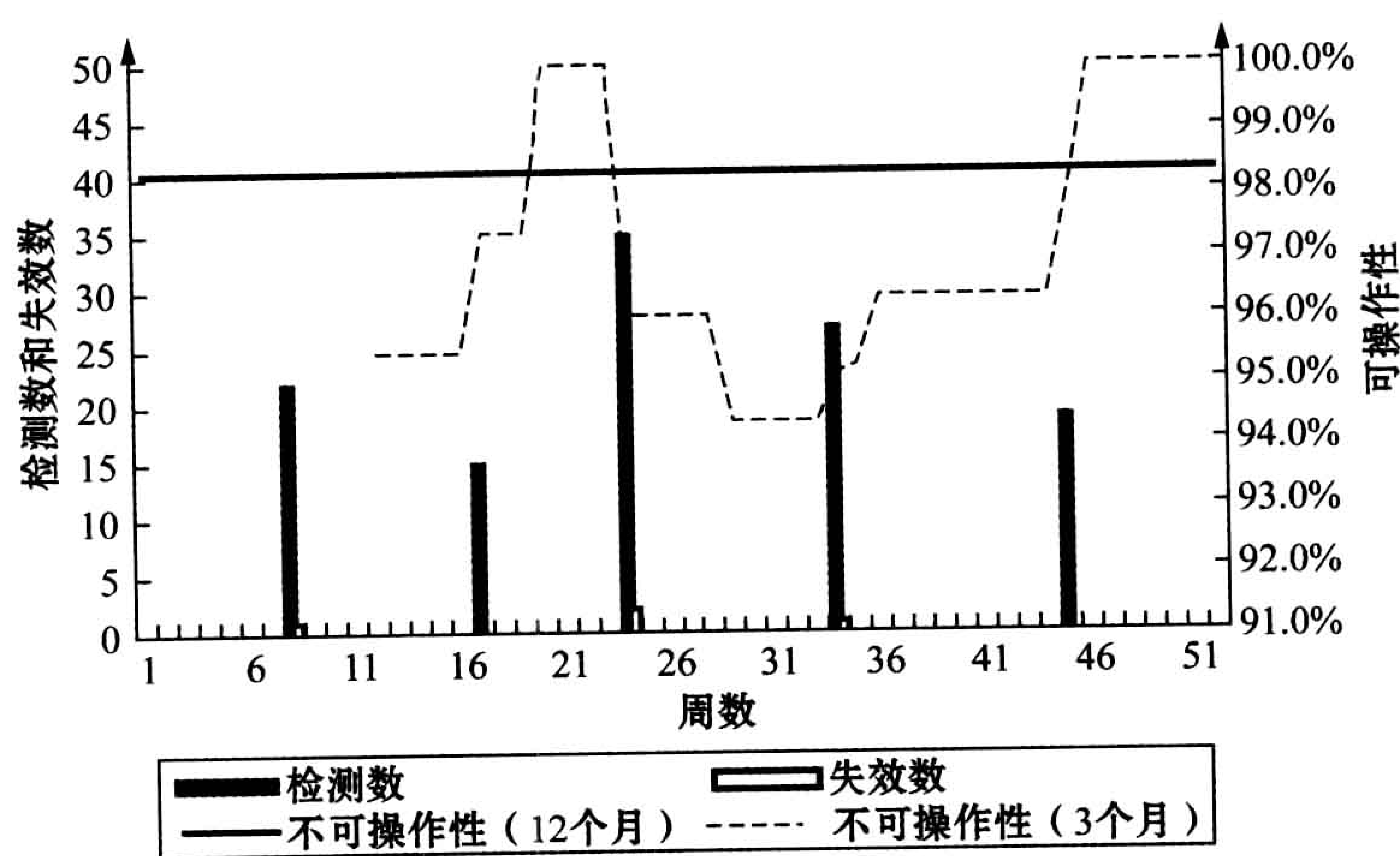


图 5.10 喷淋检测、失效及平均可操作性数值(3 个月和 12 个月平均值)

5.11 将风险分析研究应用于生命周期阶段 Use of Risk Analysis Studies in Life Cycle Phases

本节将对各种生命周期阶段中的风险分析研究(定性和定量)应用进行综述。提出的建议同常用的 NORSOK Z-013 要求是一致的(NORSOK,2001)。

5.11.1 概念发展过程中的分析 Analyses During Concept Development

表 5.6 对概念发展阶段应进行的主要风险分析进行了综述，包括进行分析的时间及主要目的。

表 5.7 对发展阶段应考虑的其他分析进行了综述。如果实施的话，应按照表 5.7 确定分析的时间及主要目的。

表 5.6 油田开发阶段主要风险分析概述

分析	进行分析的时间	主要目的
早期风险评估	选择主要概念，概念前阶段	● 油田开发概念的比较和排序 ● 所选择概念的优化 ● 识别所有主要危险
概念总风险分析	完成布局图和 PFD 后 发出投标邀请之前 提交 PDO 之前	● 评估是否符合接受准则和设计标准 ● 识别功能要求并作为设计规范的输入信息 ● 确定并计算意外载荷
设计总风险分析	生产和关键安全系统的布局图和管道与仪表流程图完成之后	● 设计论证 ● 检查是否符合总体风险接受准则（为安全作业所做的假设） ● 根据假设和分析的前提制定性能标准和要求
设计完成时的总风险分析	系统进行最终设计时	● 用设计完成信息更新总风险分析并反映出风险等级的任何变化 ● 为营运提供输入信息

5.11.2 营运中的分析 Analyses in Operations

表 5.8 综述了在营运阶段应该进行的主要分析，包括进行分析的时间、主要目的以及重点。

5.12　量化风险分析的执行 Execution of Quantified Risk Analysis

5.12.1　质量状况 Quality Aspects

挪威石油标准化组织的指导准则对量化风险评估研究的质量要求进行了说明(NORSOK,2001)。挪威法规中最重要的要求之一就是应该在风险分析开始前制定风险接受准则。第 5.13 节将介绍在量化风险评估研究中经常会遇到的一些问题。

表 5.7　油田开发或营运阶段可选择的其他风险分析概述

分　析	进行分析的时间	主 要 目 的
详细风险分析及涉及设计改变提案、偏差和项目阶段处理的分析(总风险分析的扩展)	概念风险分析后	● 为了提供设计输入信息,在已进行的风险分析基础上对特定风险内容进行评价 ● 评价改变等如何影响风险 ● 评价同法定要求的偏差所产生的影响
定量/定性研究(失效模式与影响分析、危险与可操作性研究等)	为评价系统设计,在工程阶段适合进行或要求进行时	● 识别系统设计中所需的改进
制造和安装的综合风险和 EPA	对制造和安装概念进行决策之前	● 为制造和安装的概念和方法提供输入信息 ● 确定在制造和安装过程中需要进行观察的营运和环境限制

5.12.1.1　在健康、环境与安全范围内使用量化风险评估 Use of QRA in HES Management Context

如何将使用量化风险评估作为作健康、环境与安全管理的一个部分是需要考虑的一个重要问题,比如将量化风险评估用于哪些方面及何时应用等。以下是一些相关的重要内容。

为了确保在设计和作业实施过程中能主动有效地使用量化风险评估，应根据对相关作业的考虑来计划风险分析。这可以决定量化风险评估工作在项目中开始的时间，注意不能忽略需要有足够的输入数据。这个问题应针对以下情况进行考虑：

- 新项目，比如开发新油田和海上设施，包括概念选择、布局开发、技术系统设计以及作业程序计划等；
- 对现有海上设施和设备的改造，包括改变营运模式或油田布置等；
- 扩展现有海上设施或整合到现有海上设施中。

风险评估还应对一些其他情况进行审查或考虑，但量化风险评估可能并不是最合适的工具。这些情况包括：

- 组织改变；
- 海上设施退役及处理。

配员水平的改变会产生一些需要考虑的因素，比如暴露于事故中的人员数，这时使用量化风险评估可能就比较合适。但有些内容在过去无法通过量化风险评估进行适当的表达，包括正常作业或紧急情况下的程序改变、工作环境条件改变等。这种情况在将来屏障与营运风险分析（BORA）方法得到发展后可能会发生改变(见第 6.2.6.1 节)。

5.12.1.2 进行量化风险评估的先决条件 Prerequisites Before QRA is Started

制定有关实施和使用风险评估的要求时，必须能确保评估结果为决策过程提供正确、足够的输入信息。这意味着在进行风险分析前需要阐明很多内容：

- 风险分析的目的必须明确定义，并同健康、环境与安全管理要求保持一致。
- 必须识别和确认分析结果的目标群体。目标群体通常包括健康、环境与安全管理人员以及营运和/或工程管理层。离岸工作人员也拥有了解风险内容并得到研究结果的合法、合规权力。

- 为确保模型和假设的现实性，还应制定计划，在分析中包括作业人员。
- 必须为作业定义相关的决策标准。
- 选择合适的分析方法要部分基于研究的范围和局限性，这需要进行明确的定义。
- 可预见的敏感性应定义到建模的输入信息中，这样模型就能适合敏感性的要求。

表 5.8　营运阶段的主要风险分析概述

分　析	进行分析的时间	主 要 目 的
总风险分析更新	营运阶段	● 由于经验、修改、模型改进、标准改变、营运模式、配员水平、维护理念等原因对风险等级进行更新
关键作业的风险分析，包括安全工作分析	作业计划	● 识别危险 ● 为达到安全工作性能而对风险降低措施进行确定
营运阶段总风险分析的修改	营运阶段的规律性	● 确保风险等级处于可控范围 ● 确保营运人员熟悉最重要的风险因素及其重要性 ● 识别并遵从早期阶段制定的假设 ● 更新 DSHA
修改的综合 TREPA	确定修改细节之前	● 根据实施的修改对营运阶段进行评价 ● 识别危险 ● 确定可能的风险降低措施
修改工作的综合 TREPA	确定实施修改的方法之前	● 在修改工作中对营运阶段进行评价 ● 识别危险 ● 确定可能的风险降低措施

基于对失效的反复观察，建议应仔细考虑对量化风险评估结果的有计划使用。有时研究并不能得到预期的结果，在这种情况下如果已经对相关行动的过程进行了考虑就会非常有利。如果事先没有注意的话，要理性地对待意外结果是很困难的。

5.12.2　假设与前提的记录整理 Documentation of Assumptions and Premises

分析的假设与前提之所以重要是因为它们常常会对结果产生相当大的影

响,同时也是使量化风险评估研究成为“活文档”的最好方法。假设与前提的典型例子包括:

- 海上设施上的作业水平,比如吊车移动量、高温工作的范围等;
- 配员水平、分布、工作计划;
- 安全系统的操作;
- 应急响应系统的性能及行动的表现。

有时可能会认为至少从长远的角度来看,量化风险评估中的假设要比结果更为重要。结果对于紧随的后续措施很重要,但必须在相对比较短的时间内采取必要的行动。而另一方面假设则更有代表性地构成了研究的“活”要素。以下是涉及假设的重要方面:

- 假设需要在早期阶段予以确定并同负责海上设施的组织进行讨论以便得到确认和接受。
- 需要系统地收集并说明假设,并记录在相关文档中。对改变假设的可能影响进行说明是有好处的,而充分的互相参照也很重要。
- 当研究完成后,为使研究成为“活研究”,还需定期对假设进行跟踪和检查。

将假设划分为3种类型可能是个好办法,因为直接进行假设跟踪和检查工作的人员是不同的:

- 设计基础;
- 营运假设;
- 建模假设。

5.12.3 典型研究的说明 Typical Study Definitions

表5.9说明了一些典型研究的大致工时预算和时间计划。

5.13 体验量化风险分析研究的挑战 Challenges Experienced with QRA Studies

本节概述量化风险分析研究经常会体验到的一些挑战。相关内容可参考本书的其他章节。

5.13.1 危险识别 Hazard Identification

进行危险识别经常发生的问题是不够系统化或对营运和/或整合失效或错误不够重视。造成的后果是无法保证危险识别工作的完成。

用于筛选非关键危险的标准应进行记录，但这很少能做到。无须进一步考虑的危险应详细记录，包括对这些危险所做的评价。这部分工作常常根本没有得到考虑。

表5.9　油田开发项目中的典型风险评估研究

研究类型	典型的研究定义			说　明
	研究范围(海上设施)	预算(工时)	持续时间/月	
概念安全评价	设计阶段的整体海上设施	1500	3	非常依赖于所涵盖的细节水平
总风险分析(详细量化风险评估)	设计或营运阶段的整体海上设施	2500	5	非常依赖于所涵盖的细节、范围和复杂性水平
碰撞风险研究	设计阶段的平台结构或营运设施	500	2	包括概率分析、风险降低措施的后果和敏感性
坠落物体风险评估	平台区、结构/船体、海底设施	400	2	范围包括概率分析和后果分析
危险与可操作性研究	生产系统、公用设施系统		2	工时基于团队规模以及所分析系统的规模和复杂性
井喷风险研究	钻井、完成、生产和干预计划，设备和程序	400	2	

（续表）

研究类型	典型的研究定义			说　明
	研究范围（海上设施）	预算（工时）	持续时间/月	
逃生和撤离风险研究	逃生通道撤离和救援的方法及程序，包括外部资源	700	2	用于所有相关的意外和环境情况，定性和定量研究
火灾风险评估	主动和被动防火系统，包括供应和动力系统	400	2	用于所有意外情况，包括火灾后的爆炸
爆炸风险研究	过压载荷和通风区域	500	3	定性和定量研究 用于所有泄漏和起火源 包括使用促燃爆炸仿真软件
安装阶段风险评估	油田安装期间的整个结构	500	2	根据危险和安装的复杂性 定性和定量研究
对于修改的风险评估	对现有海上设施所做的修改			根据危险、复杂性和修改情况

5.13.2 风险的分析 Analysis of Risk

NORSOK Z-013（NORSOK，2001）所述的分析方法的要求是公认最为详尽的要求，涉及模型和工具的使用以及前提和假设的记录。

其中一个很少能达到的要求是对假设和前提进行必要的记录。通常对涉及设计的假设记录得非常详细，而与营运相关的假设就不能很好地涵盖。一般记录得最差的是分析假设，而为了使分析透明化，经常有许多分析假设是需要进行记录的。

虽然一般能对设计假设进行详细的记录，但有时也会进行不必要的假设。甚至对已经营运了好几年的海上设施进行设计假设也不罕见，可能是因为分析小组对系统能力不熟悉或还不明确。通常这些方面可作为不确定源加以排除。保留这种不必要的假设还会对已进行的工作造成不良影响。

当使用软件包进行分析时，有时就会记录得不够充分。由于很容易认为软件文件里记录了分析的情况，所以不必进行完整的书面记录。但这会使任何第三方都无法对分析进行审查，同时也没能做到对工作进行详细的记录。

另一个问题是对需要进行详细后果计算的情况进行选择。这些情况必须能代表风险全景，但是却没有显而易见的选择方法。不同研究的选择方法大相径庭，说明不同的方法都是可以使用的。

对适用性原则通常不进行记录或记录得非常简略。挑战性在于确定什么才是有代表性的，而随机选择泄漏率少量、中等、大量的情况可能并不具有代表性。使用的泄漏率至少应可以根据设计能力进行调整，比如能反映出发生不同事态加剧情况时的泄漏率。

为了解研究与所有适用要求的一致程度，过去几年挪威石油安全管理局(PSA)委托进行了一些研究审查。这些审查的一个结论是有时研究对重要参数的定义不明确，比如对“群体-个体风险”的定义。有时这将导致风险分布计算时产生错误。

过去几年里，在对已经营运一段时间的海上设施使用海上设施特殊数据方面有了显著的改善。

对已经营运一段时间的海上设施进行分析与新海上设施的分析是不一样的。其中一方面可以由被称为“屏障与营运风险分析”的方法进行说明(见第 6.2.6.1 节)。这种方法直至 2006 年底才投入使用，将来可能会得到更广泛的应用。另一方面涉及对泄漏发生后的事故后果进行建模。建模应将重点放在营运阶段可能会受到影响的参数上，这些参数同设计阶段可能受到影响的参数是有着很大区别的。

海上危险的分析通常比较浅显，对于识别可能的风险降低措施完全不适用。第 11 章就此进行更为详细的论述。

碳氢化合物泄漏后果的事件序列分析一般也比较粗略，对于安全系统性能(屏障要素)没有给予足够的重视。建模还应该能反映出所考虑的风险降低措施或替代方法。

对于最重要的安全系统(屏障要素)，分析应包括失效机制，并应通过对关联性、共同模式失效和共同起因失效的分析来进行。但是这几乎从来没有得到过有效而广泛的实施。

5.13.3　分析结果的呈现
Presentation of Analysis Results

对研究结果进行呈现通常能得到足够的重视。第 14 章将对此深入论述，

并对如何详尽呈现结果提供了建议，包括对敏感性和不确定性评价进行记录。

5.13.4 识别降低风险的措施 Identification of Risk Reduction Measures

如果危险识别不完全，就会限制识别风险降低措施的潜力。

此外，正如第 14 章及 Aven and Vinnem(2007)所述，在很多情况下分析过于关注对符合风险接受准则进行说明。对于将研究广泛应用于识别风险降低措施而言，分析小组所关注的情况通常就显得非常有限。

识别可能的风险降低措施的一个重要方面是风险建模能够明确描述营运和设计，Vinnem et al. (1996a)对此进行了论述。总体感觉英国海上设施量化风险评估研究的模型更加不容易与营运和设计建立联系。

5.13.5 研究结果在风险管理中的应用 Use of Study Results in Risk Management

量化风险评估研究结果在风险管理中的应用是泰耶·艾文教授和本书作者所著另一本书的主题(Aven and Vinnem，2007)。

第 6 章　分析技术

Analysis Techniques

第 5 章已概述了执行量化风险评估的所有步骤，本章将致力于可能会使用的重要分析技术。

6.1 危险识别 Hazard Identification

第 5 章所介绍的危险识别是量化风险评估的首要步骤。通常称其为危险识别或简称为 HAZID。危险识别旨在能够：

- 确定涉及计划营运或活动的所有危险；
- 创建风险全解概览，以规划更深一步的分析工作；
- 提供可能发生不同类型事故的概述，以便记录引起风险的事件范围；
- 尽可能提供保证即没有忽视任何重大危险。

因此，危险识别最重要的是提供充分的综述，并能供众多具有不同经历的人员审阅。下列方式方法可用于识别危险：

- 检查表　　由专家制作的清单，以有助于审阅有计划的营运情况。
- 早先研究　　基于类似研究的危险清单，通常作为新研究的起始点。
- 意外事故与故障统计　　类似于检查表之列表及案例故事，但都是基于实际故障和/或意外事故。例子在后页列示。
- 危险与可操作性研究　　确定可能导致意外事故发生的故障及条件详细顺序的技术。
- 安全操作　　为了确定可能导致意外事故发生的故障及条件顺序的评审程序技术。
- 初步危险分析　　作为初步筛选研究的常用技术，但也可以单独使用。初步危险分析（PHA）将在后续小节内

描述。

- 与详细研究相比较　　在类似情况下所使用的详细研究可用于确定哪些序列可能会引起危险情况。

第 3.1 节所概述的挪威大陆架诸多意外事故均可作为危险识别的输入数据。

在危险识别中考虑的详细程度有时是不确定的，需要在启动工作之前确定所采取的方法。

对设备及营运均需进行危险识别。对于涉及设备的危险可以细分为 3 个层面：

- 设备层面：所有个体设备物品、阀门、仪器仪表、船舶等均分别视为可能危险；
- 子系统层面：所有子系统，包括分离阶段及压缩阶段等，均分别视为可能危险；
- 系统层面：所有系统，包括分离、压缩等，均分别视为可能危险。

很明显，每一层面中的危险数目从上至下依次递减。在大型海上设施中，设备层面中可能会确定存在着 500 至 1 000 个危险。子系统层面中可能会确定存在着 50 至 100 个危险，而系统层面中可能只存在 20 个危险。

在设备层面上操作的主要问题是其产生了大量危险，其中大部分危险均类似于已确定的设备。因此，一般概述非常容易不为人知。而系统层面可能太粗糙，各类特性及重要差异也可能不容易为人所知。因而，子系统层面通常是最适合的。

对于涉及作业方面的危险只有一个层面，因为每次作业均须详细考虑。

危险识别最困难的方面是要确保没有忽视重大危险。这是需要应对完成任务的挑战。已搜索了有助于达成该目标的结构化分析技术，但至今尚未获得成功。也许可以说，实施非常详细的危险与可操作性研究（HAZOP）可能会达成该目标。然而，可能会禁止使用完成如此程序的资源。

请看下面例子。15 年之前，一座半潜式平台经历了失控压载营运，该平台产生了严重倾斜，其危险程度达到了须考虑是否需要撤离全体工作人员。后来发现该问题的根源起于平台的一条腿柱发生了轻微火灾，导致控制系统中作用

于压载阀的液压油发热。由于回油管路太狭窄，以致不能迅速充分地减轻热量所产生的额外压力，从而造成阀门操作失控。当火势被扑灭后，该问题就迎刃而解了。所要考虑的关键问题是危险识别是否能识别出此类危险。

6.1.1 危险与可操作性研究 HAZOP

危险与可操作性研究(HAZOP)是用于识别危险与可操作性问题的一种分析技术。该技术通常应用于涉及硬件、软件与操作员之间界面的任何情况，虽然最初是为评估生产厂的撤离而开发的。该方法也可用于识别危险。

在危险与可操作性研究分析中，跨学科团队采用系统方法来识别由于生产条件预期范围偏差而发生的危险与可操作性问题。通过采用一套应用于各离散点的特定"制程参数"或生产系统中"研究节点"的固定"引导词"，富有经验的团队领导者有组织地引领团队进行工厂设计。例如，引导词"高"与制程参数"层次"相结合，可能会产生涉及与设计意图"高层次"偏差的问题。有时候领导者会使用检查表或制程经验来帮助团队制作团队在危险与可操作性研究会议上需要考虑的偏差列表。团队会根据所讨论问题来分析任何偏差的影响，并确定产生偏差的可能起因(如操作失误、输出管路堵塞等)、偏差的后果(如液体外溢、污染等)以及适当提供防护设施以防止偏差(如液面控制、管路输送溢出物等)。如果起因与后果是显著的，并且防护设施不足，所有细节都需要记录下来，以便于采取后续行动。

在实施危险与可操作性研究详细分析之前必须获取涉及制程设计及营运的详细信息，因而，最常应用于管道及仪表流程图制作后，或在修改及操作现有设备期间的详细设计阶段。危险与可操作性研究分析还需要许多方面的知识，包括制程、仪器仪表、计划或实际营运，该信息通常是由团队成员提供，而这些团队成员通常都是各领域内的专家。危险与可操作性研究团队通常由 5 至7 位涉及工程、营运、维护、卫生安全及环境保护等不同背景及经验的人员组成。带头作分析的团队成员常会得到其他成员的协助，通常称其为秘书，随着分析工作的进展，他/她会记录团队的审议结果。

危险与可操作性研究涉及下列制程参数:流量、温度、压力、液位、反应、混合、分离、排水、检查、维护、启动、关机等。危险与可操作性研究的引导词注重于特殊方面的设计意图或制程参数或状态:

- 没有(没有流量);
- 减少(减低压力、减少流量等);
- 增多(更高温度、更多流量等);
- 逆向(逆向流动);
- 另外(额外流量);
- 其他(流量);
- 波动(流量);
- 早期(开始)。

危险与可操作性研究报告特别重要,尤其是涉及已确定实施的文件。因此,很有必要配备有能力的秘书,还有一些软件包能有助于危险与可操作性研究的管理。在 Crawley et al. (2000)和 Lees(2004)中能找到范围更广泛的危险与可操作性研究材料。

6.1.2　初步危险分析 PHA

初步危险分析(PHA)是用来识别危险的一种分析技术,如果不尽力阻止其发生,将会产生危险事件。所考虑的典型危险能源包括高压石油及天然气、其他高温液体、高空物品(提升的物体)、高速物体(直升机、船舶)、炸药、放射性物质、噪音、易燃材料、有毒材料等等。

初步危险分析通常用于评估在总体设计及前端工程设计阶段项目早期的危险。并不需要完整的详细设计,然而允许在早期阶段识别可能危险,从而在设施及设备上选择最有利的配置。通常采用的程序包含以下步骤:

- 定义子系统和营运模式;
- 识别涉及特定子系统或营运情况的危险;
- 定义危险形成后导致特定的危险事件;
- 估计事件发生及每一危险情况可能后果的概率,然后使用特定规则对可能性及后果进行分类;
- 识别及评估准备采取的减少危险事件发生概率或限制其后果的行为;
- 评价不同危险事件的交互影响,同时还考虑共模与共因故障的影响。

初步危险分析通常是使用某种表格形式的结构化方式来进行的。逐一对特定子系统或营运已识别的每一危险事件进行研究，并且，将达到特定危险事件、或者子系统或营运“风险等级”记录在表格一栏内。

6.1.3 安全操作 SAFOP

安全操作(SAFOP)研究是采用危险与可操作性研究技术来分析工作流程与程序，以识别及评估风险因素。安全操作(SAFOP)是评估新(计划)或改变操作风险的有效工具，可适用于所有使用程序之处，包括程序干预、材料处理、起重机操作、维护、海事活动等。由斯堪帕瓦(Scandpower)风险管理(2004)所描述的安全操作(SAFOP)检查表有以下一些(用于海上作业)的引导词：

营运前检查：必要设备、未在计划表内的拖轮，必要设备检查/未执行测试；
天气：不清楚的气候限制或意外天气恶化(营运中止)、天气预报、低温；
涌流：未意料到的强大涌流问题；
位置：物体、格架、拖轮或船舶位置不正确；
动力：无动力或动力不足(拖轮、电气、液压、气体等)；
设备：设备故障或缺乏；
仪器：仪器故障或缺乏；
责任：未定义/责任不清(拖轮、船舶、港口等)；
通信：通信设备故障或缺乏，通信线路、噪声、交接班；
执行：以错误方式、时间、速度等执行工作任务；
程序：程序缺乏或不清楚；
可见性：操作员是否能完全看清楚；
运动：物体、拖轮或船舶运动方向失控；
稳性：不稳定条件件；
公差：定位公差等；
接口：错误、污染、腐蚀、海生物等；
阻塞：不能执行运动；

破裂：　关键设备破裂、超载；
通路：　拖轮、船舶、港口等没有足够通路/空间；
逃生路线：　针对防护要求做充分检查；
应急：　备份程序/设备无法使用；
其他：　未包含在上述引导词内的其他内容；
冲击：　物体之间的冲击，(全体人员之间的)挤压；
掉落：　物体从上层掉落下来；
跌落：　人员跌落至下层；
能量释放：　电力、压力、热力、制冷、放射性等；
毒性释放：　有害物质释放。

6.1.4 蝶形结法 Bow-tie

蝶形结法(Bow-tie)是可用来有效演示如何能实现设备安全管理系统的过程。蝶形结法能协助公司/经营者分析和管理处于危险及风险的业务，并且通过图形显示及说明危险、控制、风险减少措施与企业健康、安全、环境活动之间的关系。

图 6.1 所示的蝶形结图描述了危险、威胁、屏障、事态加剧因素、控制、后果、恢复准备措施及关键任务之间的关系。在许多情况下，蝶形结法已成为说明各因素之间关系的首选工具。实现这一目的最知名工具是“论文(THESIS)”，最初是由壳牌国际构思，现在由 ABS 咨询有限公司与壳牌国际共同拥有和开发(见附录 A)。

在许多组织中，上述所有相关方面之间的关系始终是故障或薄弱环节——使用蝶形结法可帮助显示在许多相关文件中经常看到的所有相互作用及链接的松散关联。

蝶形结实质上是传统使用的故障与事件树，即故障树构成蝶形结的左侧，而事件树则构成蝶形结的右侧。

然而，蝶形结还呈现了在适当位置上的“屏障”，以防止“威胁”释放出危险，而且“恢复准备措施”减少了危险后果的严重程度。

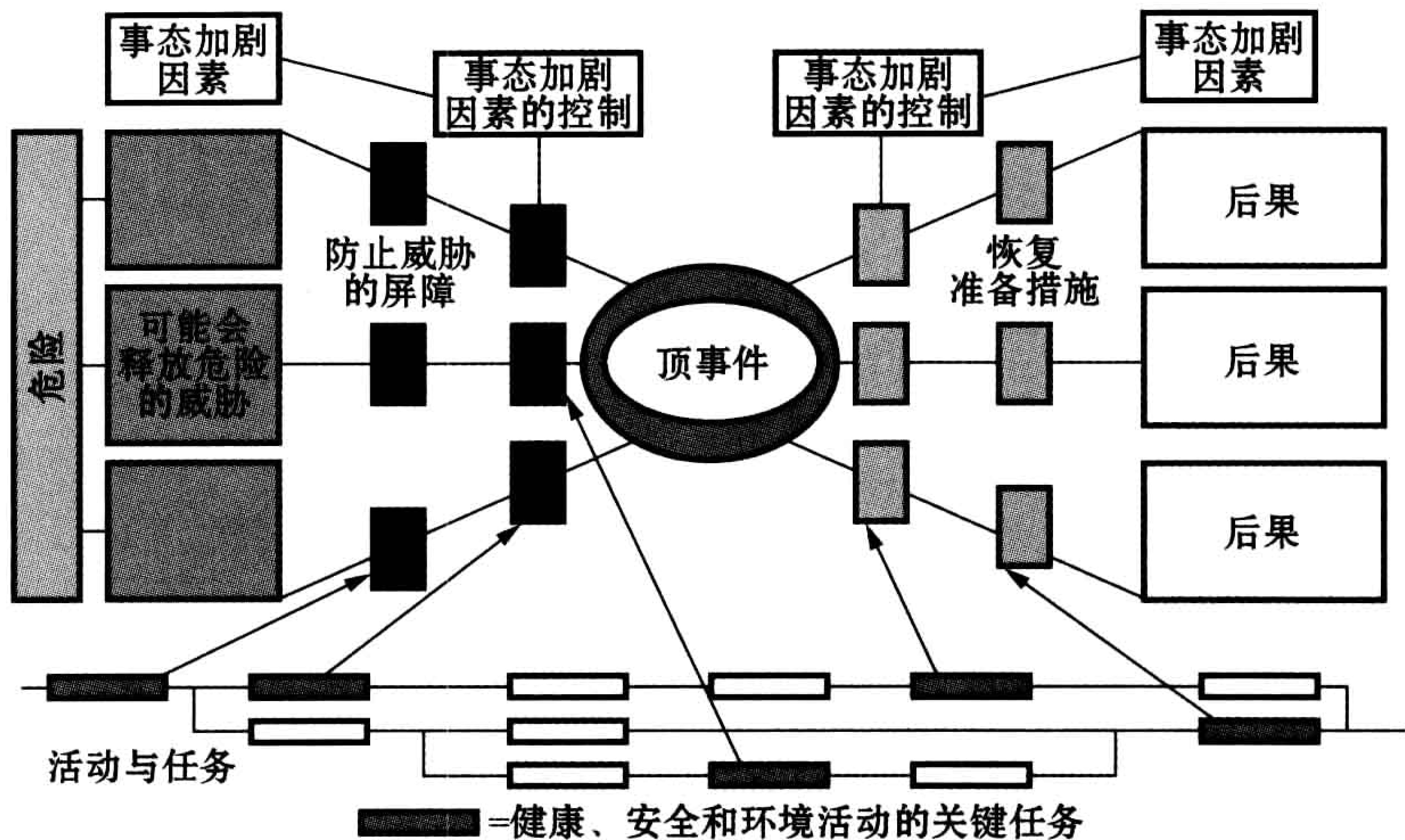


图 6.1 典型的蝶形结图

6.2 起因、概率和频率分析 Cause, Probability and Frequency Analysis

起因、概率和频率分析技术应用于量化风险评估以确定许多不同参数，包括：

- 可能会导致意外事故发生的可能起因；
- 触发事件的频率；
- 在发生意外情况下，安全系统出现故障的条件概率；。
- 操作和/或环境条件特别恶劣的概率；
- 发生特别严重意外事故后果的概率；
- 意外事故发生时人员在该地点的概率。

对于定量目的，有许多工具能应用于计算概率或频率，包括模拟方法、理论建模以及故障树分析与事件树分析等形式方法。频率通常是基于故障及意外

事故数据的统计分析，失效模式与影响分析还可采用定性分析。下文简要介绍各种最重要方法。

6.2.1 故障树分析 Fault Tree Analysis

有几本很好的教科书提供了故障树分析（FTA）。在这些材料中能找到详细介绍，现简要介绍如下：

- 霍伊兰和劳沙德（Høyland and Rausand 1994）；
- 亨利和熊本（Henley and Kumamoto 1981）；
- 维斯利等人（Vesely et al 1981）；
- 艾文（Aven 1992）。

故障树分析是合乎逻辑及结构的流程，能帮助识别系统故障的潜在起因，包括触发事件起因或屏障系统故障等。

开发该项技术是为了识别设备故障起因，并主要作为可靠性与可操作性评估的工具。故障树是能显示导致危险事件发生的不同组合设备故障及人为错误的图形化模型，危险事件通常称作为顶事件。故障树技术的强势在于其具有能力包含硬件故障及人为错误，从而能使现实表象步骤与危险事件相关联。并且能用整体分析方法来识别预防及缓解措施，而且还将会导致注意力集中于危险事件的根本原因，不管是由于硬件或软件问题。

故障树分析（FTA）特别适合于复杂及高度冗余系统的分析。对于系统中单一故障可能导致危险的事件，例如基于单一故障技术的故障模式与影响分析（FMEA）和危险与可操作性研究分析（HAZOP）更为合适。有鉴于此，故障树分析往往是在另一危险性评估技术（如危险与可操作性研究分析）已经具体指出可能发生危险事件需要进一步调查的情况下使用。

故障树分析输出是基于布尔逻辑门（即“和”与“或”）的失效逻辑图，布尔逻辑门描述不同事件的组合是如何导致危险情况的。许多故障树可能需要用来充分考虑大型生产厂所有已确定的顶事件，而在选择顶事件加以考虑时，分析师需要做出判断。

图 6.2 所示故障树显示了为何在办公室内的局域网服务器可能会被窃的一些具有特征性的原因。这一简单的例子着重于随机盗窃或计划盗窃，而后一种情况中指令与知识两者都必不可少。

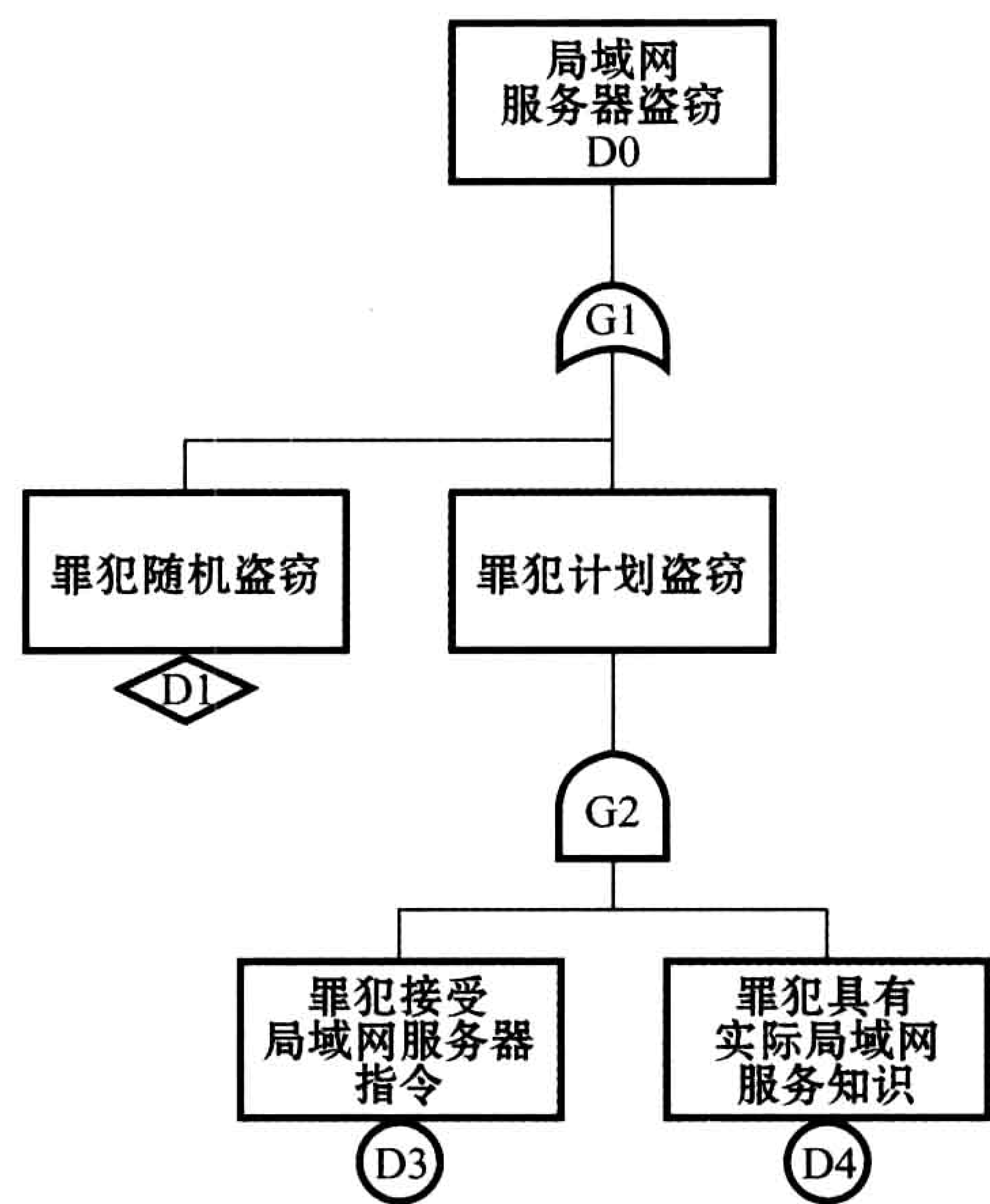


图 6.2　故障树例图

下面列举的是故障树特点：

- 顶事件：　　　　事件 D0
- 关口：　　　　　G1；G2
- 未发展的事件：　D1
- 基本事件：　　　D3；D4

两个关口是不同的，正如例图中图形所示，并可能具有如下特点：

- 关口 G1："或"关口、布尔型"或"，如果所有输入事件发生，输出也就会发生。
- 关口 G2："和"关口、布尔型"和"，如果所有输入事件发生，输出也就会发生。

如例图中图形所示，这些事件也各不相同，所有事件都显示为矩形，其下面都有不同编码。各种差异可能会有如下特性：

- 未发展的事件 D1：钻石型，其起因不会进一步发展。
- 基本事件 D3、D4：圆型，最低级别的故障树，其中采用了可靠性数据。

如果 D1 或 D2 其中之一（或两者）发生，顶事件 D0 也就会发生。如果 D3 和 D4 两者都发生，事件 D2 也就会发生。

通过评估故障树，就有可能识别导致发生危险事件不同组合的失效或错误。根据需要引起顶事件故障的类型及数量，不同失效组合可能是定性排列。对这些失效组合列表检查可以揭示系统设计或操作弱点，从而通过引入更多屏障可以考虑安全改进的可能性。

从图 6.2 中可容易地观察到在下列事件组合情况下的顶事件将会发生：

- D1；
- D3 和 D4。

这意味着在图 6.2 中有两个最小割集：D1 是指令一的割集，而 D3 与 D4 共同构成了指令二的最小割集。割集是所有事件的故障树集，如果该集内所有事件发生，就会导致顶事件发生。最小割集是不能进一步归约的割集，并仍保持其具有割集的性能。为便于说明，集合{D1；D3，D4}是割集，但不是最小割集，因其可能会进一步归约。{D1；D3}也是割集，但也不是最小割集。

为了进行故障树分析，有必要详细了解设备或系统功能、详细加工图及程序，并了解部件故障模式及其影响。应始终如一地使用经验丰富及称职的工作人员，以确保高效及高质量的评估。

6.2.2　事件树分析
Event Tree Analysis

对于构建、分析及使用事件树并没有大量文字材料可用于说明。因此，该主题将在第 6.3 节中予以相当详细的讨论。

6.2.3 失效模式与影响分析 Failure Mode and Effect Analysis

失效模式与影响分析是简单技术,并不需要大量理论描述,而只需在实践基础上进行此类研究。在下列文选中可能会找到有帮助的描述及概述:

- 霍伊兰和劳沙德(Høyland and Rausand 1994);
- 斯坦麦提斯(Stamatis 1995)。

6.2.4 统计学仿真分析 Statistical Simulation Analysis

最著名的模拟技术是在一些教科书中描述的所谓蒙特-卡罗方法。因此,该主题在此不再重复,有兴趣的读者可去阅读:

- 霍伊兰和劳沙德(Høyland and Rausand 1994);
- 里普利(Ripley 1987)。

6.2.5 分析方法 Analytical Methods

分析方法的典型例子是碰撞频率的建模,这将在第 10 章予以讨论。

6.2.6 营运风险分析 Operational Risk Analysis

长期以来,离岸石油工业在工程防御(或屏障)火灾及爆炸危险的海上设施方面投入了相当多的财力。屏障的性能在一定程度上遵循了性能标准及关键性能指标,虽然通常还不够全面。安全系统总是逐个进行处理,不允许出现有

待识别的相关性与共同模式/起因故障。

含碳氢化合物设备的泄漏事件中有一半是发生在危险区域，并且与人类活动相关，在此期间，为了不引起中止稳定的生产，工程防御往往是会部分受抑制或钝化。此类泄漏的发生清楚地表明在这些操作中与遏制泄漏相关的系统及人类防御不能很好地正常工作。在执行人类活动过程中，很显然需要了解更好地执行屏障性能的知识，尤其是非技术性的。

欧洲安全与可靠性会议（ESREL 2003）（Vinnem et al. 2003a）论文集中的一篇论文讨论了营运风险评估。所得出的结论显然是需要改进屏障分析。这些方面形成的大量的最初研究活动称之为屏障与营运风险分析（BORA）项目（Vinnem et al. 2003b）。在分区按序存取法 7（PSAM7）论文（Vinnem et al. 2004）中提出了一些初步意见，并介绍了推荐方法。

已对海上生产设施的两个物理与非物理屏障的建模与分析案例开展研究。为防止意外事件发生的屏障，以及旨在消除/减少后果发生的屏障，都囊括在内，并在执行营运活动时特别强调屏障。研究结果应能使行业及主管部门通过下列措施而改善安全：

- 掌握相关屏障的性能，以及改善的潜力；
- 识别需要加强的全部屏障，特别是在营运活动中；
- 确定屏障风险减少的有效措施，外加有效的修改及配置变化。

分析尽可能是定量的。屏障一般是具有可靠性/可用性、功能性及稳定性等特点。所有这些执行措施都需要进行说明。挪威规范要求屏障之间的关联性应该是可知的。因此，分析的执行其根据是相关的常见起因或屏障要素之间的模式失效与关联性。

6.2.6.1　屏障与营运风险分析方法论 BORA Methodology

屏障与营运风险分析（BORA）项目提出了方法论，从而能分析营运屏障失效，正如 Vinnem（2004）所概述的，并在 Aven, Sklet and Vinnem（2006）中有详细介绍，其中介绍了屏障与营运风险分析（BORA）的方法论，以及为风险影响因素（RIF）评分的各输入源。该方法论有 3 个主要过程：

- 各场景、基本起因和风险影响因素的定量分析；
- 平均频率/概率的量化；
- 海上设施特殊频率/概率的量化。

这一点参见图 6.3，而且海上设施特殊频率/概率量化的输入源亦参见图 6.3。可利用下列输入源：

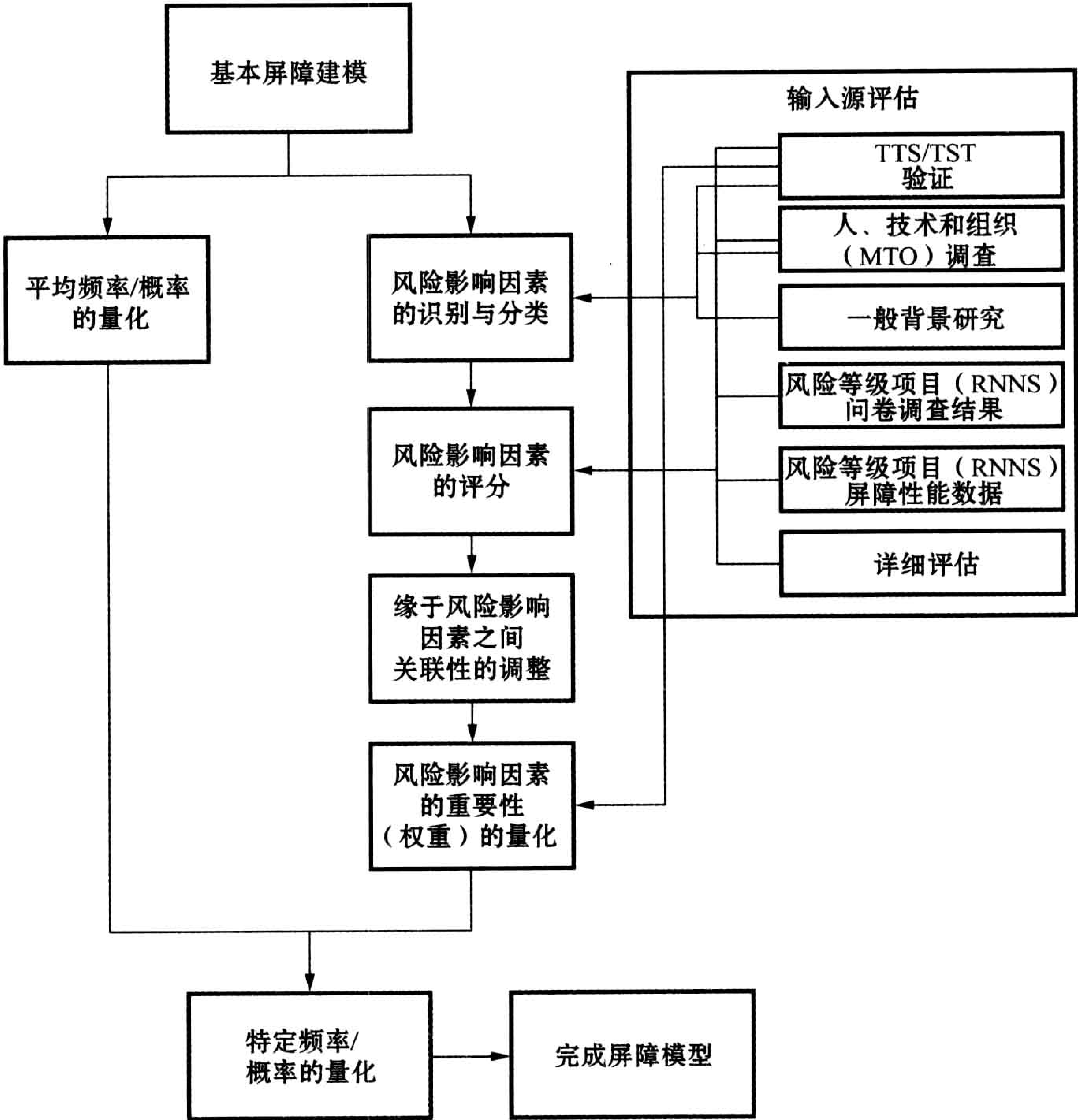


图 6.3　屏障与营运风险分析(BORA)方法论主要方面汇总表

- TTS /TST 验证；

- 人、技术和组织(MTO)调查；
- 风险等级项目(RNNS)问卷调查；
- 风险等级项目(RNNS)屏障性能数据；
- 详细评估(专家输入)；
- 一般背景研究。

该 TTS/TST 验证(Thomassen and Sørum，2002)注重于屏障的技术与文档方面。这些验证是由挪威国家石油公司开发的，并且该方法一直由位于挪威的几家挪威离岸作业公司所采用。人、技术和组织(MTO)调查(Tinmannsvik et al.，2005)特别强调过去几年中人类与组织方面许多事故与意外事件，主要是由或以挪威石油安全管理局(PSA)的名义进行该项调查。风险等级项目(RNNS)主要是由挪威石油安全管理局(PSA)为整个挪威大陆架(PSA，2006a and b)每年开展的项目，其旨在于屏障与营运风险分析(BORA)方法论，并有两项可利用活动：

- 每年两次的问卷调查；
- 每年收集的屏障性能数据。

问卷调查涉及大量工作环境因素的问题，同时还涉及许多与感知风险和安全文化相关方面的问题。屏障性能数据(参见 PSA，2006a)与所选屏障要素相关，其中大部分是技术屏障。

传统上，量化风险评估的事件建模始于作为触发事件的围护损失，并且还对限制泄漏潜在后果的屏障进行建模。在屏障与营运风险分析(BORA)项目中，我们想要使屏障要素实现可视化，以防止出现泄漏本身。鉴于此目的，已制定了在不同情况下可能导致围护损失的“屏障框图”。对于“因设备未正确安装的围护损失”，参见图 6.4。

屏障与营运风险分析(BORA)项目中的基本风险模型可视为扩展式量化风险评估模型，然而，与典型的离岸量化风险评估研究相比较，还有几种扩展模式：

- 事件树与故障树相连接在一个普通的风险模型中；
- 围护损失屏障的详细建模包括反映由于不同原因碳氢化合物释放的触发事件，以及旨在防止碳氢化合物释放的安全屏障；

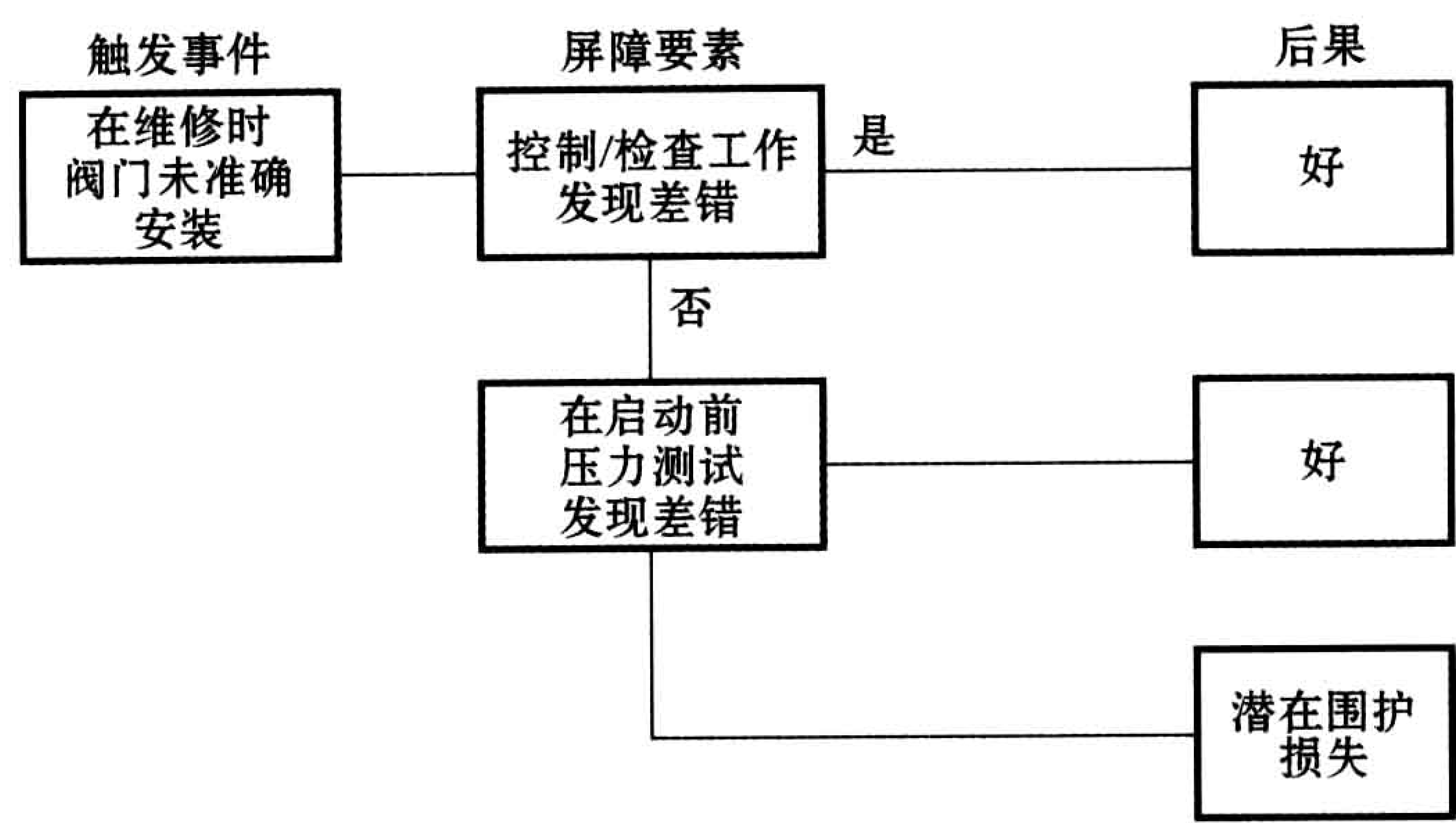


图 6.4 “设备错误安装”屏障框图

- 将营运活动功能归并为营运屏障,包括使用检查表、第三方工作控制与人工检查等,以便于及时检测风险模型中的腐蚀状况。

从不同释放情况中计算出的释放频率构成了后果分析的输入数据。屏障与营运风险分析(BORA)方法可使用有关释放的统计数字,以便于校准通过分析各释放情况而获得的定量数目。还考虑使用其他方法来校准所得出的数目。

然而,可能会对不同的释放预防屏障的相对重要性以及变化的影响给出评价,后者在涉及风险控制与风险降低措施的优先选用方面至关重要。

应当指出的是,在准备本稿件时并没有商业软件可应用于屏障与营运风险分析(BORA)。

6.2.6.2 贝叶斯信念网络 Bayesian Belief Network

贝叶斯信念网络(BBN)的使用获得了风险分析师的一致好评,因其相当灵活,非常适合考虑人类与组织因素的性能,并且还提供风险影响因素性能之间更精确的定量联系。Jensen(2001)和 Pearl(2001)介绍了该做法。

最近已开发出一种称为混合因果逻辑(HCL)的方法,它能让贝叶斯信念网络提供输入信息至故障树与事件树。其基本方法是由 Mosleh et al. (2004)提出,而对于应用于离岸工业的一些建议则是由 Røed et al. (2007)提出。图 6.5 所示为贝叶斯信念网络的简要图例。

下面例子是意外事件,“在出油管线检查时,由于法兰或螺栓未正确组装”。

在检查之后，但在启动之前，组装出油管线。该触发事件所造成的事件序列作为屏障框图显示在图 6.4 中。有 3 种屏障功能可用于防止触发事件的发生。技术人员在出油管线组装后进行自我控制，然后施行独立（第三方）控制。在启动之前进行最后泄漏测试。

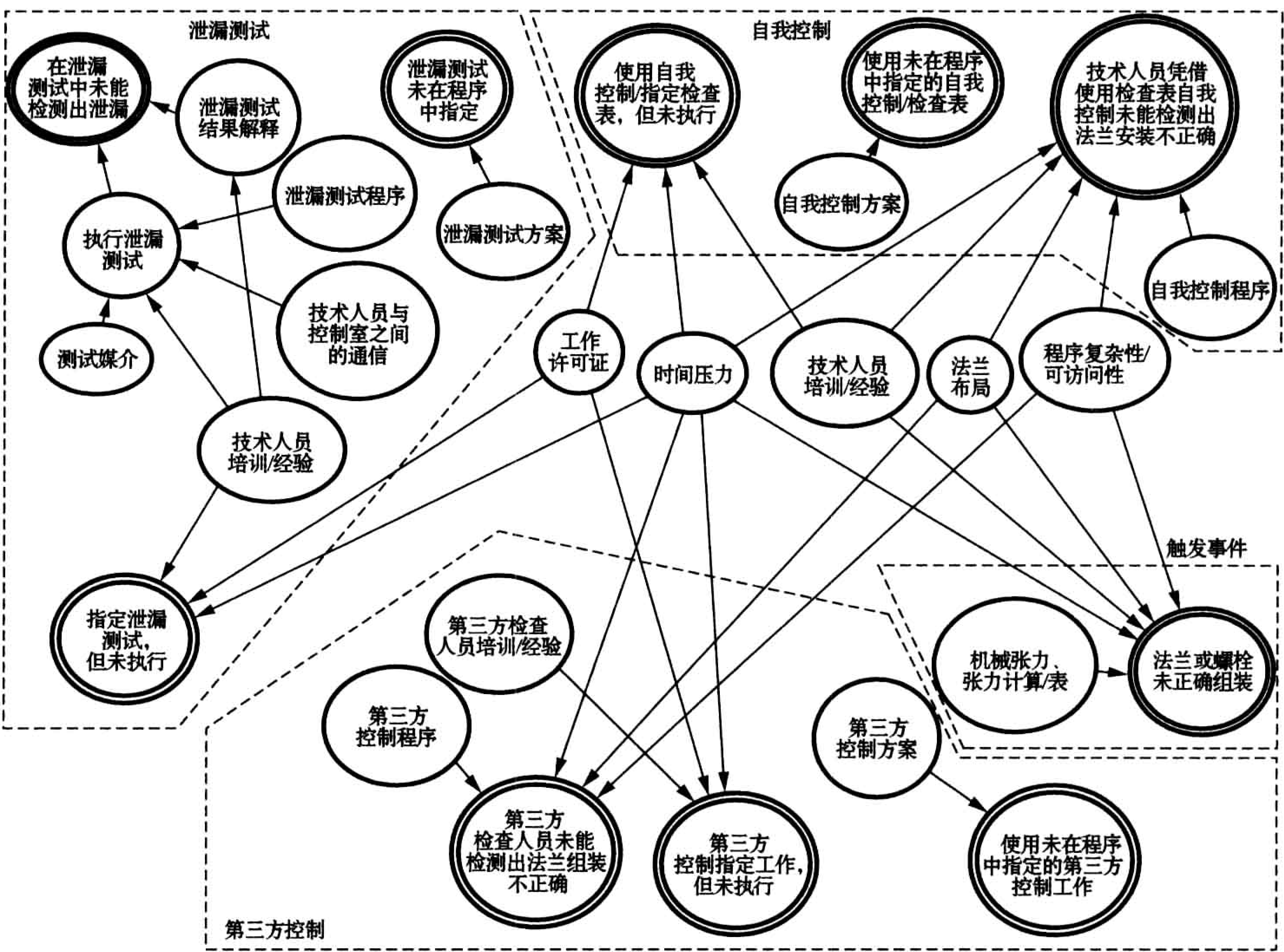


图 6.5　贝叶斯信念网络例图（Røed et al. 2007）

6.3　事件树分析
Event Tree Analysis

6.3.1　事件树基础
Basics of Event Tree

事件树是描述危险情景会导致可能事件链的视觉模型。对触发事件（有时

也称之为顶事件)进行了定义,并对其频率或发生概率进行了计算。通过使用对每个提问都只需回答“是”或“否”的问卷列表,确定触发事件会导致的可能后果。这些问题通常会与系统中的安全屏障相对应,例如:“绝缘失效了?”因此,该方法反映了设计者的思维方式。

替代结果概率所计算的每个问题形成逻辑图中各分支点。这些分支点通常称之为事件树的“节点”。替代终点事件(通常也称之为终端事件)概率或频率的计算是基于触发事件概率或频率,以及与每个分支相关联的条件概率。终点事件可能会聚集成群,并对整体风险全解产生类似后果。

事件树与因果图两者非常相似,虽然后者使用更多文字与图形符号。因果图比较容易理解,但显然只有少量信息可以压缩至一张图表内。这可能似乎就是首选事件树的部分原因。根据事件树,通常可执行下列步骤:

- 后果种类的频率计算;
- 灵敏性分析(某些参数变化的影响);
- 确定对每个后果种类的重大影响。

除了用于频率/概率预测,事件树也可用于直接计算后果。死亡事故风险评估的简单方法是对各分支点分配一定的死亡率(单程分支的情况下),这些数据相加后就可找到终点事件的死亡率。最典型的计算后果的方法是分别计算相关的不同分支和/或终端事件。

事件树方法基于的理论非常简单,只需稍作解释就行。下文各节概述了事件树分析理论与实际应用。

6.3.1.1 事故序列建模 Accident Sequence Modelling

量化风险评估最关键(可能也是最困难)的任务之一就是潜在事故序列的建模。这一点已由因火灾造成液压系统回油管路压力升高而导致压载阀误动作的意外事件得到了论证。在绝大多数情况下,识别可能危险以及准确表示可能发生的事故序列确实是个难题。该建模主要困难如下:

- 工序通常与时间高度关联;
- 事态加剧涉及不同工序与不同设备之间的复杂交互作用;

- 人员干预有时会对事态发展产生极大影响；
- 细小差异在某些情况下通常会导致完全相异的最终场景。

动态情况可能是所面临的主要挑战。为了获得逼真的建模，工具与方法需要能以最准确的方式来反映各种动态。人们意识到事件树模型通常是静态工具，所以不能真正适合于详细分析事故序列及其工序的动态。然而，至今为止对替代工具与方法的开发几乎一直没有多大成效。有一种称为 PLATO® 的替代方式将在第 6.5.1 节作简要介绍。

6.3.1.2　事件树说明
Event Tree Illustration

作为初步说明的事件树(见图 6.6)是评估从平台撤离的事件树。事件树中的触发事件假定为需要从平台撤离的事件，如井喷、大火等。根据具体情况，该触发事件可能会引发不同场景。以与节点相关的一些问题形式，在事件树右侧描述了不同境况。

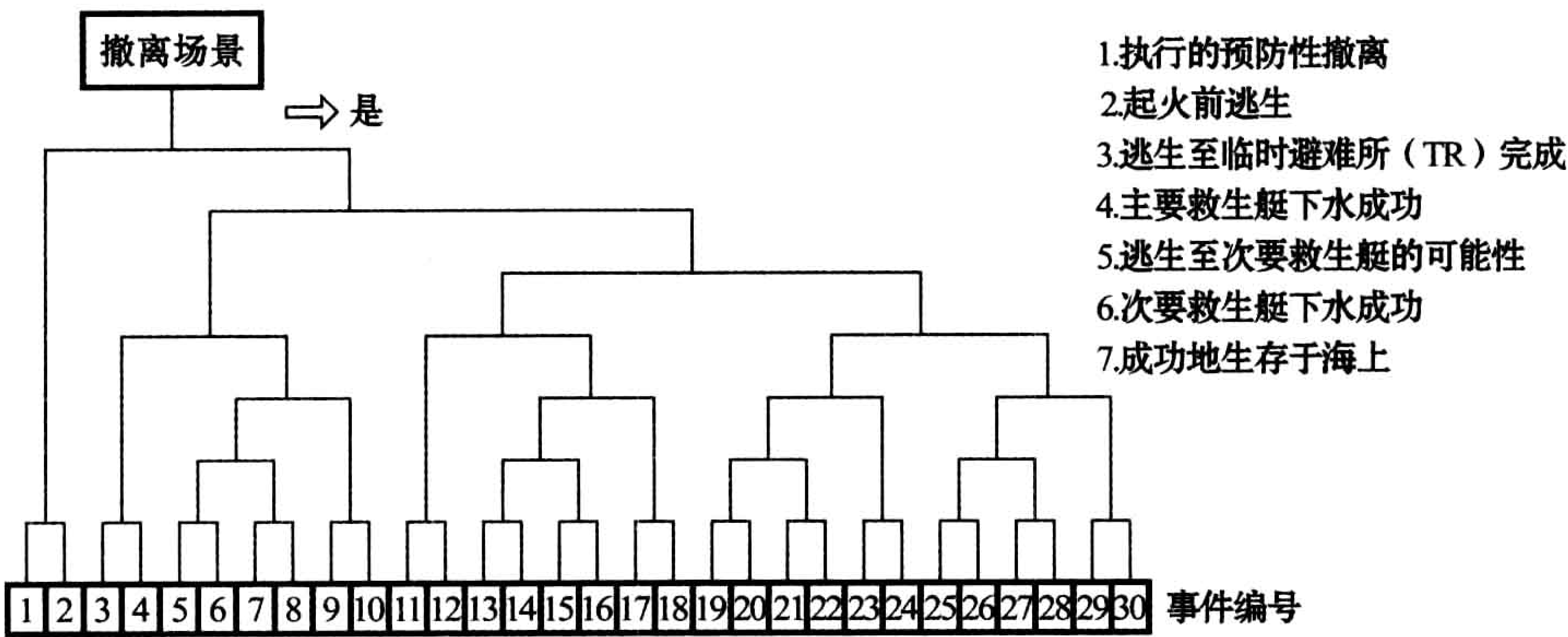


图 6.6　逃生与撤离事件树

首先要考虑的问题是从平台预防性撤离是否已经实施。若已如此执行，那么我们就沿着事件树左边第一分支移动，否则，我们就向右边移动。

其次的问题是在起火之前是否已经实施逃生。显然，如果已执行预防逃生，此问题就是多余的。对于第一个问题中的左边分支，第二个问题是不需要对其考虑的。然而，对于右边分支则是关联的。

用此方法，根据替代后果的中间状况，我们可以继续通过事件树将各场景划分为越来越详细的场景。

6.3.1.3 事件序列
Sequence of Events

意外场景的分析包含涉及碳氢化合物泄漏的下列要素：

- 泄露媒介建模；
- 事件序列的分析，包括起火和屏障建模；
- 事态加剧建模；
- 损害建模；
- 后果建模。

海上平台的这些工序的分析非常复杂。事实上，海上平台是最难以分析偶发事件的发展情况。有关流程设计方面，陆上石化产品和化学工厂都比较复杂，但由于各部件之间的间距，以及设备都安置在地面上，所以，可认为比较简单。大型海上平台通常有不同类型的设备交互安置在 3 至 4 层上。而且，就意外事故后果事态加剧而言，核电厂（甚至宇宙飞行器）都比大型海上施备简单，虽然就工作程序而言核电厂更为复杂。

由于该原因，事件序列建模在离岸量化风险评估方面导致有最大的不确定性。对于这方面的研发工作正在继续，并且有一个或两个替代方案可用于代替传统方式的事件序列建模。然而，至今为止尚无任何单一技术已能真正取代事件树的使用。

在构建事件树时有几个方面需要仔细考虑，其中最重要的是需要考虑事态加剧因素序列。序列的重要性与事件树中所使用的条件概率事实密切相关。第 6.5.2 节将更详细地予以讨论。

就生产设备泄漏方面而言，序列问题尤为重要，因为安装了许多安全系统及功能，所有这些都是为了减少涉及泄漏的风险。

6.3.1.4 节点分支规则
Node Branching Rule

可能会提及的另一方面是，为了节省空间，从每个节点（从各节点二元输

出）出发分支成两个相互排斥序列的规则有时会未予遵守。对于少量天然气泄漏起火，可考虑以下选择：

- 立即起火（隐性火灾）；
- 延迟起火引起爆炸；
- 延迟起火引起火灾；
- 未起火。

如果按照从每个节点引出双分支的标准规则，就导致需要 3 个节点：

- 未起火，相对于
- 起火，其分裂为：
  - 立即起火，相对于
  - 延迟起火，其分裂为：
    - 爆炸；
    - 火灾。

这 3 个节点将占据事件树图形表象的很大空间，如果一个节点“允许”所有 4 个序列都作为输出，就可能会有更简明的图形表象。

图 6.7 所示为每个节点二元分裂的简单例子，而图 6.8 则为重画的每个节点有 3 个输出的相同例子。这两种图形还显示了事件树不仅可以沿水平方向

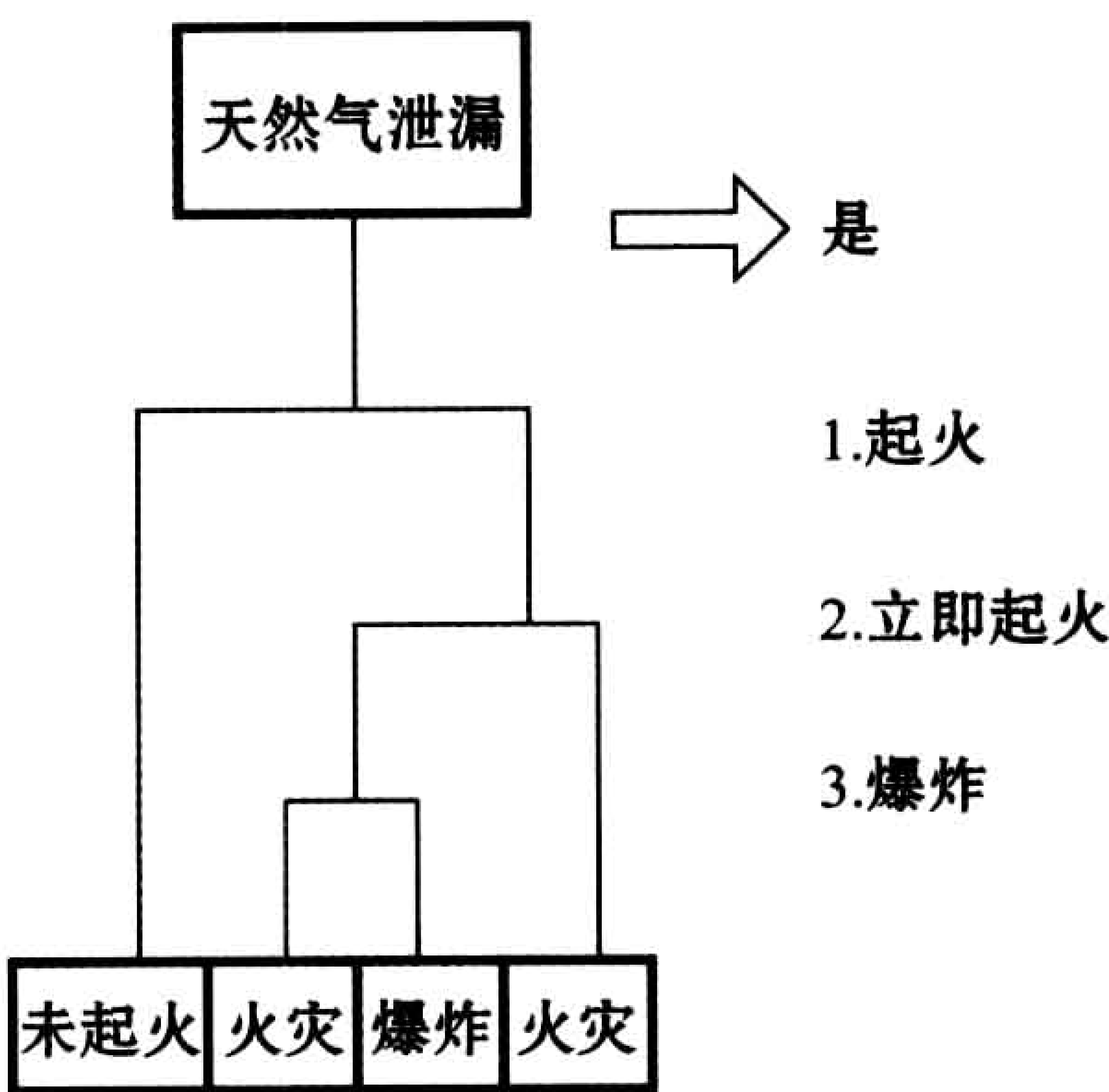


图 6.7　二元分裂事件树图例

画，也可以沿垂直方向画。

在任何情况下要求所有输出相互排斥是正确的。例如，在考虑撤离失败或成功时，其结果归为“失败”或“成功”两者之一的二元状态，如图6.6中的事件树所示。

当每个节点只有两个输出分支的标准规则做严格应用时，那么终点事件总会比事件树中的节点多一个。当每个节点允许有更多分支，那么终点事件数目可能少于节点数目。

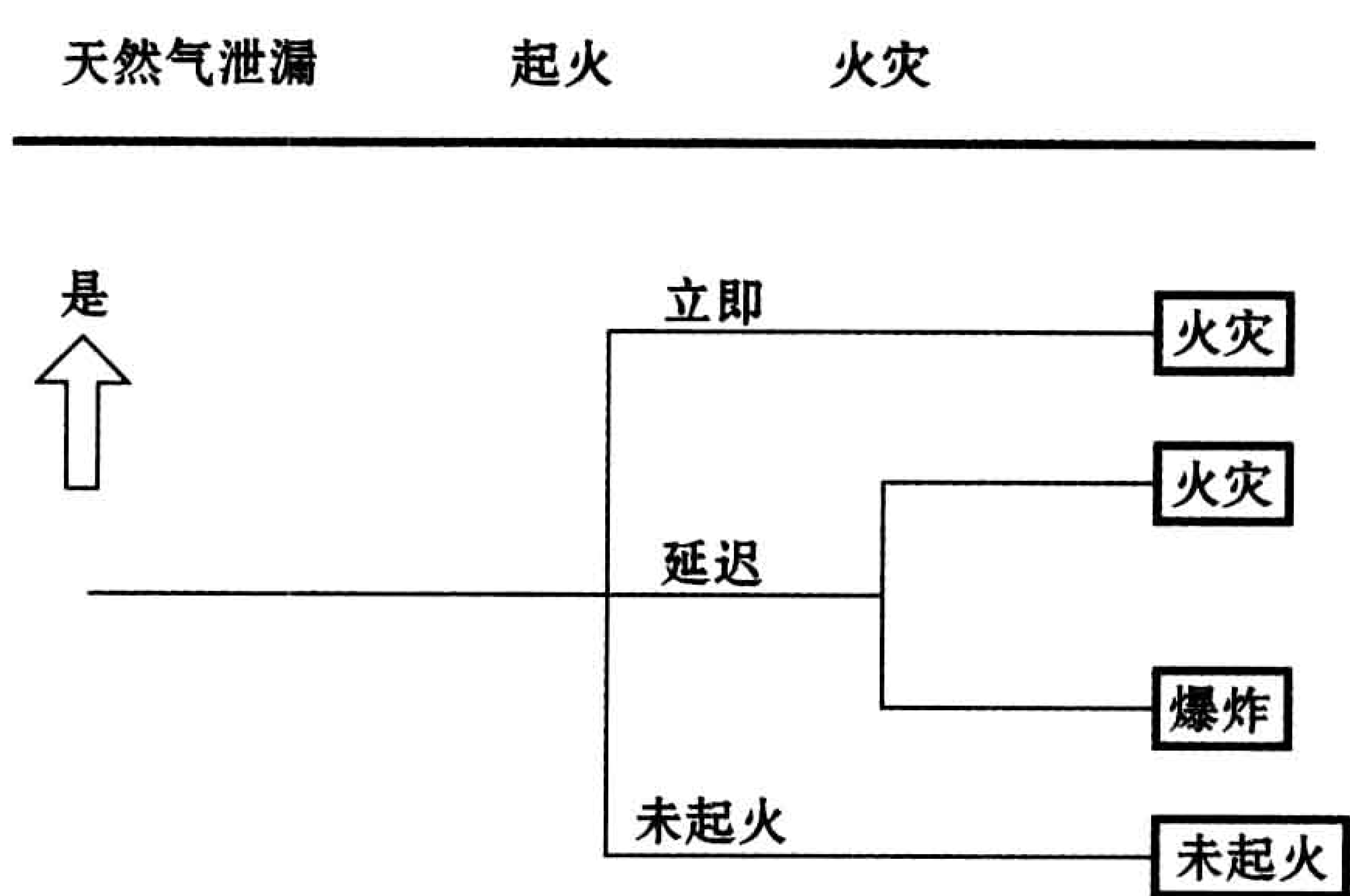


图6.8　组合节点事件树图例

6.3.1.5　事件树循环
Loops in the Tree

由于序列是关键问题，人们可能会认为在事件树中的循环会相当有用。例如在火灾情况下，典型的节点问题就是自动系统能否有效控制火势。如果自动控制失败，则通常将会导致事态进一步升级。但在循环方式下，我们可以考虑采用额外的消防措施(激活手动控制)，并且进行循环以提高预防事态进一步升级的几率。循环可提高建模序列的真实感。然而，采用循环会导致频率计算相当复杂，但也有理论可用于解决该问题(Nielsen，1976)。虽然该理论已存在30年，然而事实上此替代方案几乎从未使用过。

虽然人们认识到事件树完全不是理想的事故序列建模，但它有3个非常显著优势能弥补其不足之处：

- 容易理解的图形；
- 容易使用；
- 提供了将可靠性分析整合至事故序列建模中的良机。

最后，可能需要指出的是事件树通常从顶端至底端，或从左边至右边绘制，如图 6.8 所示。自顶端至底端绘制惯例贯穿于本书，图 6.8 和图 6.9 是该惯例的例外情况。

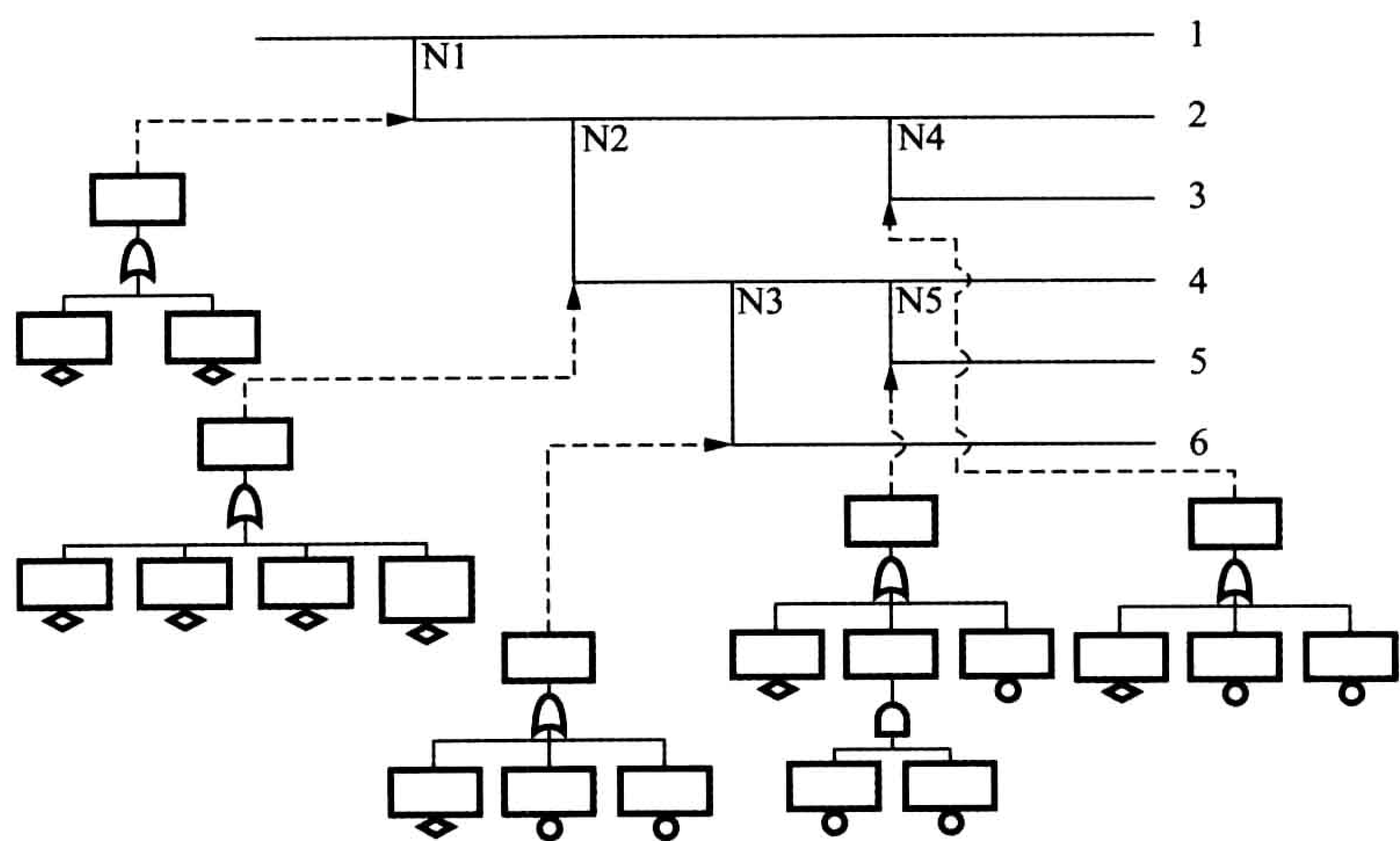


图 6.9　事件树与故障树之间整合图示

6.3.1.6　概率和频率计算 Probability and Frequency Calculation

事件树还可应用于不同场景可能性的量化。概率值可以分配给每个分支，这样我们就建立了条件概率树。如果我们再次返回至撤离例子（见图 6.6），可假设执行预防性撤离的概率为 0.6。这意味着不执行预防性撤离的概率为0.4。然后，假定预防性撤离尚未执行，我们可假设在起火前的逃生概率为 0.8，作为条件概率。假设没有采取预防逃生措施，起火前逃生的总概率于是就变为：0.4×0.8＝0.32。

通过继续使用本逻辑贯穿该事件树，我们可得出在事件树内终端事件的概率。如果我们将其乘以触发事件的频率，我们就可得到每个终端事件的频率。

6.3.1.7 事件树与故障树的组合 Combination of Event Trees and Fault Trees

第 6.4 节概述了 RiskSpectrum® 软件，指出该软件允许事件树与故障树进行整合分析。图 6.9 的简图概述了该组合的原理。

6.3.2 主要的危险场景 Major Hazard Scenarios

在离岸量化风险评估中主要使用事件树是为了对碳氢化合物泄漏及其他各类重大危险的事故序列进行建模。事件树中使用的主要危险类型有：

- 井喷；
- 碳氢化合物从生产设备泄漏事件；
- 碳氢化合物从立管泄漏事件；
- 公用设施系统火灾、泥浆处理及分离；
- 建筑与船舶意外事故。

独立的事件树可开发用于每个相关泄漏类别及每件设备。因此，对于大型平台，事件树的数目将会十分可观，因而有必要消除那些并不是真正需要的事件树及分支，以避免失去概观效果。

本节讨论的重点是包含井喷在内的碳氢化合物泄漏。

6.3.3 触发事件频率 Initiating Event Frequency

在事件树中显示了触发事件频率。事件树通常表示的泄漏有以下几种：

生产泄漏：

- 少量泄漏；
- 中等泄漏；
- 大量泄漏。

立管和管线泄漏：

- 少量泄漏；
- 中等泄漏；
- 大量泄漏；
- 全通径。

井喷：

- 满流；
- 流量减少；
- 不同流程/释放位置。

根据分析情况，各类别的数量可能会有明显变化。各泄漏类别可能是基于：

- 质量流，常以 kg/s 计；
- 泄漏面积尺寸（通常使用等效直径圆孔）。

在天然气成分、压力、质量流与开口区域之间存在着独特关系。通常使用的泄漏分类为：

- 少量泄漏：0.1～1kg/s（有时从 0.05kg/s 起）；
- 中等泄漏：1～10kg/s；
- 大量泄漏：＞10kg/s。

为了说明典型的发生频率，在 10 年期间内观测到天然气从某一海上设施泄漏的数值如下：

- 大量泄漏：无；
- 中等泄漏：1 次；
- 少量泄漏：19 次；
- 少于 0.1kg/s 的有记录渗漏及其他泄漏：250 多次。

另一种说明频率的方式是从风险等级项目角度而言，该项目报告了自1996年起至2005年止的10年期间内的平均频率，具体如下所示：

- 大量泄漏(>10kg/s)：每一设施年泄漏0.0069次；
- 中等泄漏(1～10kg/s)：每一设施年泄漏0.151次。
- 少量泄漏(0.1～1kg/s)：每一设施年泄漏0.45次。

6.3.3.1 如何分类 How to Divide into Categories

涉及使用两个系统中任一系统分类泄漏的潜在问题是两者都不能真实反映实际情况。该情况由于考虑如何可以对事态加剧建模而变得更为突出(该现象有时称之为“人工产物”)。

当归类分组泄漏时，其共同特点是计算每个类别。因此，对于少量泄漏，喷射火焰的长度可能是3m；对于中等泄漏，可能为17m。如果某处至下一区域生产设备的距离为7m，那么，由少量泄漏类别喷射出的火焰不会影响下一区域的设备，而从中等泄漏类别喷射出的火焰将总是会对其他设备产生影响。

然而，这是通过归类分组泄漏并给予单一代表性尺度而形成的人造情景。实际上，在少量泄漏类别中的较大泄漏可能会有超过7m长度的喷射火焰，从而会引起事态加剧。对于归类分组泄漏，逻辑系统将小于会导致喷射火焰产生影响和随后事态加剧的尺度定义为最小泄漏。下一泄漏类别是指那些由于喷射火焰造成事态加剧影响到下一区域的尺度。这些原理在图6.10中得到了阐明。

假设有5只容器全部安装在同一区域内。为便于说明原理，此图是简图，就某种意义上只显示了容器之间的距离。仪器及管系可能会使容器之间的真正间距更短。就生产区段而言，假设如下：

- 容器A和B属于同一应急切断(ESD)区段；
- 容器C和D属于同一应急切断(ESD)区段，但此区段与容器A和B所属区段不同；
- 容器E处于与所有其他容器隔离的应急切断(ESD)区段内。

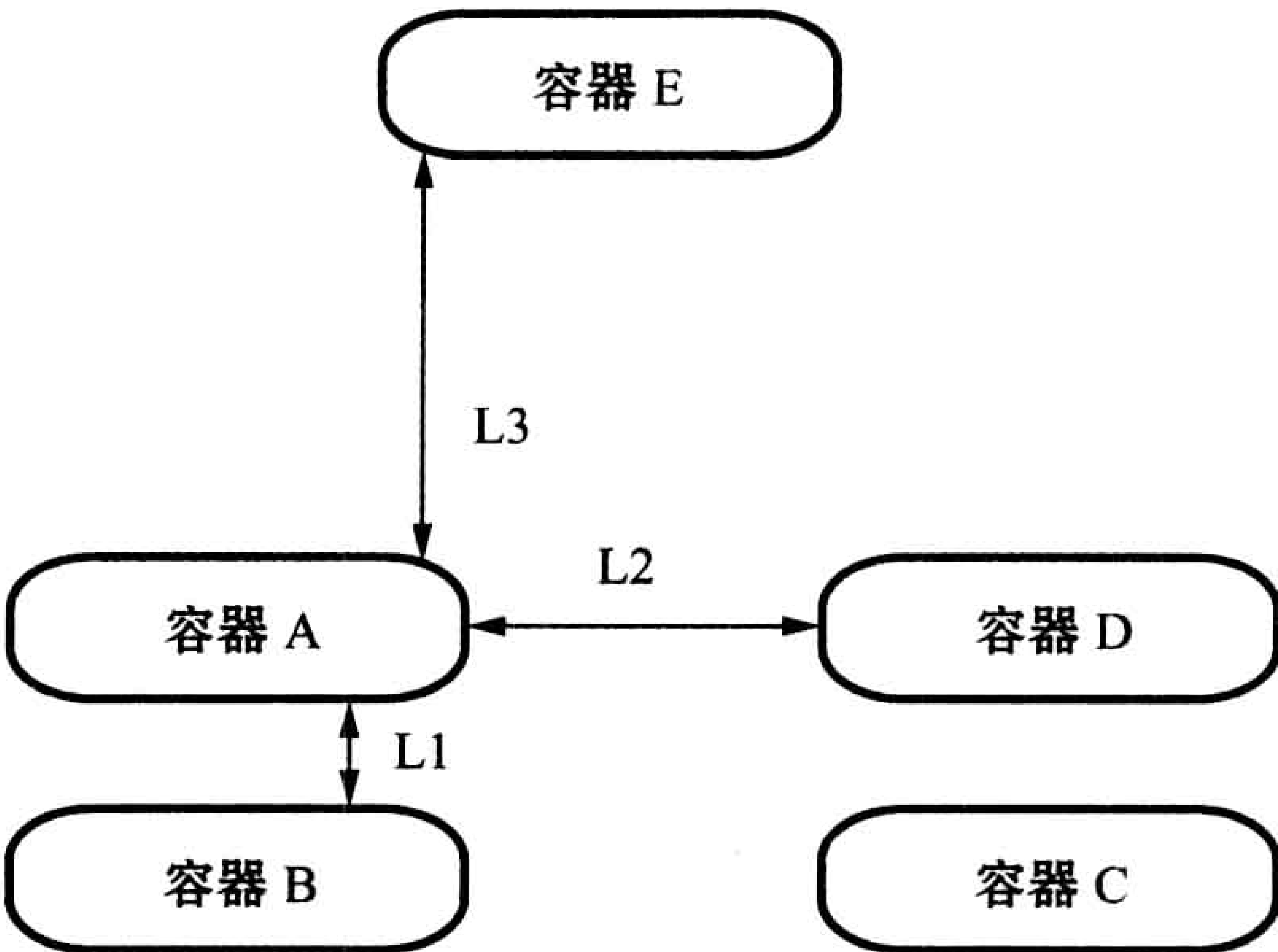


图 6.10　5 只生产容器和距离的简图(平面图)

泄漏类别现应基于与容器之间距离相关的喷射火焰长度来确定。泄漏类别可以定义如下：

- 由于容器 A 和 B 属于同一区段,距离 L1 不适用于作为这些定义的根据；
- 距离 L2 是作为重大泄漏的下限,归属于最小泄漏类别；
- 第二类是基于距离 L3,这是该类别的下限；
- 第三类应基于至防火墙的距离(未显示)。

6.3.3.2　所选类别的泄漏频率 Leak Frequencies for Selected Categories

基于系统或设备值,触发事件频率分别以每一设备或系统以及每一泄漏类别进行计算。对于详细研究,通常是基于下列设备泄漏区域来计算泄漏频率,这些设备产生总系统泄漏频率：

- 阀门；
- 法兰；
- 弯管；
- 仪器连接；
- 焊接；

- 管系；
- 压力容器；
- 冷却器和加热器；
- 立管；
- 管线。

对于所有系统和营运，天然气和石油泄漏是分开考虑的。（工业标准设备的典型平均）通用数据最常用。如第 5.10 节中所讨论的，只要有可用的海上设施特定数据都应予以采用。

此处所描述的做法是基于设备数量而未考虑作业的泄漏频率计算的传统方式。屏障与营运风险分析（BORA）项目已开发出通用方法，以考虑生产活动和作业情况。这已在第 6.2.6.1 节予以概述。

对于井喷，需区别考虑以下作业情况：

- 浅气层钻井；
- 勘探钻井；
- 试井；
- 开发钻井；
- 完成生产井；
- 完成注水井；
- 常规生产；
- 测井电缆作业；
- 挠性管作业；
- 缓冲作业；
- 油井维修作业。

该区别通常还会应用于正常偏离的油井与所谓水平井（有时会有很长水平段）、高压/高温井，以及建有多个油箱区（“多孔”井）的油井。

6.3.4 事件树的节点 Nodes in Event Trees

事件树概率表现在事件树中每个分支点（节点）处。特别需考虑以下几

方面：

- 泄漏检测；
- 起火；
- 紧急关闭、排放、燃烧；
- 消防系统；
- 爆炸和火灾；
- 意外事故影响事态加剧的范围。

此处只列示了需考虑的主要类别，在详细事件树中可能需要进一步分类。在详细事件树中的逻辑节点将涵盖下列主动和被动安全系统及功能：

安全系统的可靠性：
- 应急切断(ESD)系统，包括阀门；
- 排放阀；
- 气体检测；
- 高完整性压力保护系统；
- 火警探测；
- 烟雾探测；
- 自动和手动消防。

被动防火：
- 事态加剧(主要取决于被动防火)；
- 起火时间和地点。

人们对所有安全系统是否都应作为单独节点或事件呈现在事件树中有些争议。一些分析人士主张并不是所有的安全系统都需单独呈现在事件树中。他们认为在许多情况下将几个系统合并至一个节点是最有效的方法，从而能避免事件树太复杂而难以管理。

持相反观点者认为，应更着重于将能明确反映安全系统的节点放在事件树中，并认为这将有助于满足监管方面的要求，以证明屏障系统失效的后果。在这两种极端立场之间找到妥协通常就是最有效的方法。

让我们来举例说明一案例,其中有个节点表示为“应急切断(ESD)阀闭合”,那么,这将隐含以下屏障要素:应急切断(ESD)阀、应急切断(ESD)逻辑线路,以及自动和手动气体检测的次级功能。而该节点应急切断(ESD)阀的失效概率可用下列方式来计算(如果各要素和次级功能都是独立的):

$$P f_{TOT} = P f_{ESDV} + P f_{ESDL} + P f_{GASDET} \cdot P f_{MANDET} \quad (6.1)$$

式中:

Pf_{TOT}——应急切断(ESD)阀的失效概率;
Pf_{ESDV}——实际应急切断(ESD)阀本体的失效概率;
Pf_{ESDL}——应急切断(ESD)逻辑线路的失效概率;
Pf_{GASDET}——气体检测的失效概率;
Pf_{MANDET}——人工气体检测的失效概率。

式 6.1 可应用于许多类似情况。应当指出,该公式假设[自动]气体检测与人工检测之间是独立无关的。式 6.1 中的独立要素可由故障树分析或根据操作经验(或两者结合)来计算。

早已指出了考虑各节点正确序列的重要性。在这方面存在的典型错误可以一提的是,通常认为气体泄漏起火是事件树中首个节点,是在考虑泄漏检测之前。但起火概率与是否已经检测到泄漏高度关联。因此,在大多数情况下,首个节点应与检测有关。

6.3.5 终点事件频率 End Event Frequency

终点事件频率的计算相当简单,只涉及触发事件频率与相应条件概率相乘。然而,计算总量可能必须使用电脑。可观察到下列频率与概率之间的关系:

- 触发事件: 通常取决于其频率;
- 节点: 总是使用概率,并且主要是条件概率;
- 终点事件: 具有与触发事件相同的数值,因而通常为频率。

终点事件的频率可以表示为：

$$\lambda_{\mathrm{j}} = \lambda_{\mathrm{i}} \cdot \prod_{\mathrm{K}} p_{\mathrm{k}} \tag{6.2}$$

式中：

λ_{j}——终点事件 j 的频率；

λ_{i}——事件树中触发事件的频率；

p_{k}——分支 k 的条件概率；

K——各分支的设置，用于定义从触发事件至终点事件 j 的路径。

通常认为触发事件频率是常数，例如假设各事件发生呈泊松分布。基于该假设，概率与频率之间所存在的简单关系就如下文所示。

如果每年少量气体泄漏的频率是 λ_i，那么在一年期间内至少有一次气体泄漏的概率则可表示如下：

$$P(\text{至少一次泄漏}) = 1 - \mathrm{e}^{-\lambda_i t} \approx \lambda_{\mathrm{i}} t \tag{6.3}$$

该近似值只有在概率低于 1%时才有效（在 10%时的误差为 0.05），第一个表达式始终有效。而在一年内无气体泄漏的概率为（具有与近似值相同条件）：

$$P(0\ \text{次泄漏}) \approx 1 - \lambda_{\mathrm{i}} t \tag{6.4}$$

式 6.3 和式 6.4 既可用于终点事件，也可用于触发事件。

在事件树内的终点事件或终端事件，有时也称之为“偶然事件”。终点事件的频率通常乘以损害[条件]概率（在 0.0～1.0 范围之内），以确定损害频率，即具有安全功能的各事件频率并不是设计所支持的。

$$\lambda_{\mathrm{imp,j,l}} = \lambda_j p_{\mathrm{imp,j,l}} \tag{6.5}$$

式中：

$\lambda_{\mathrm{imp,j,l}}$——终点事件 j 的损害频率；

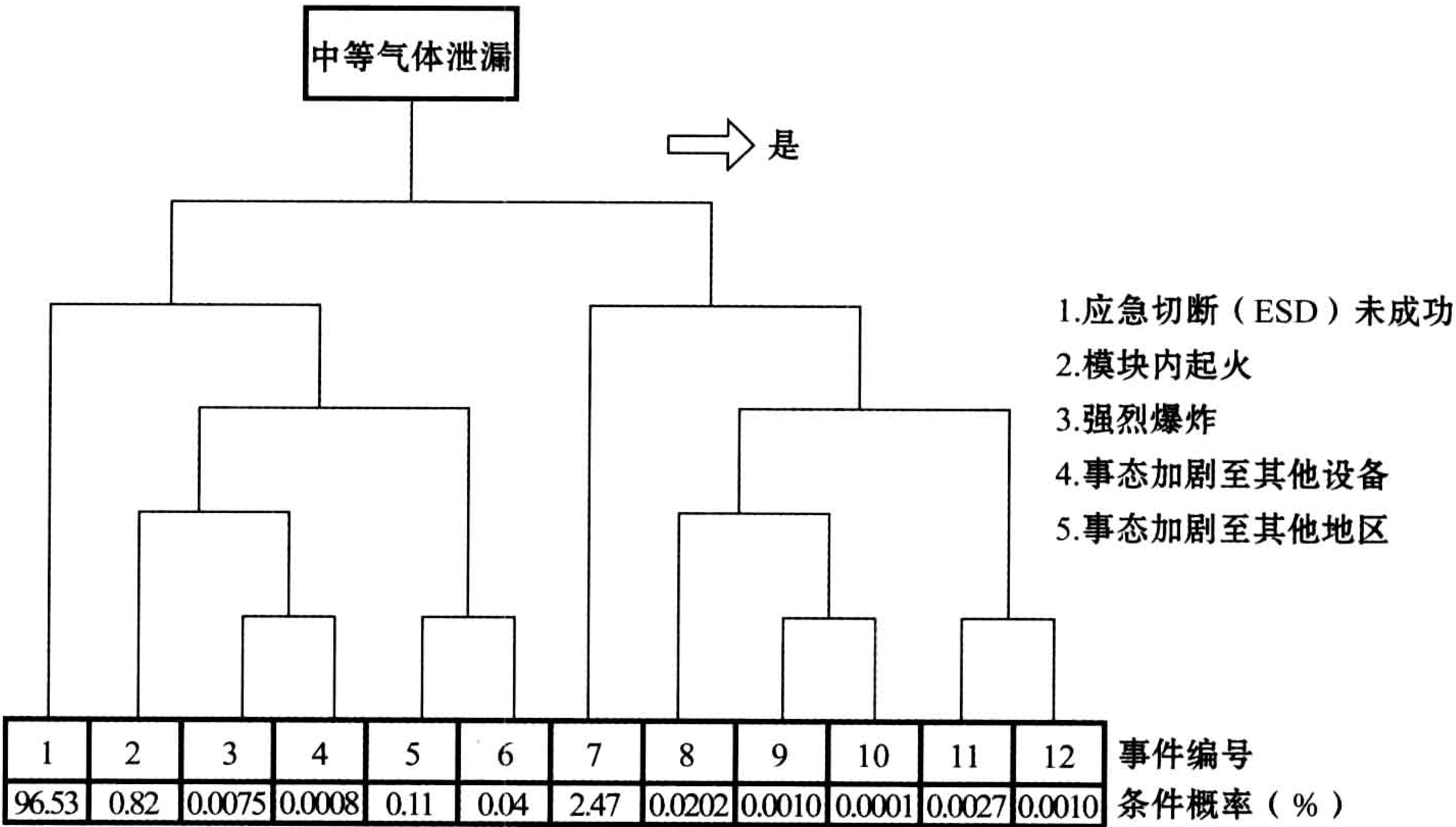
$p_{\mathrm{imp,j,l}}$——对于安全功能 l 的终点事件 j 损害的条件概率。

6.3.6 生产区内的气体泄漏 Gas Leak in Process Area

分析碳氢化合物泄漏，以考虑不同火灾和爆炸场景。事件树通常是相当简单地加以构建，但也可以较复杂地构建。

图 6.11 所示为在 1～10kg/s 范围内生产系统的中等泄漏的简单事件树。在事件树中，帕玻尔·阿尔法油井事故（见第 4.7 节）的事件序列已用粗线做了标记。此事件树只考虑一个安全系统：应急切断（ESD）系统。安全系统节点下面的各节点涉及考虑模块内起火装置，以及包括强烈爆炸的不同事态加剧机制。

图中各节点（分支点）主要集中在以下安全系统和重大安全方面：



事件编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
条件概率（%）	96.53	0.82	0.0075	0.0008	0.11	0.04	2.47	0.0202	0.0010	0.0001	0.0027	0.0010

图 6.11 在中等气体泄漏事件树中突出显示帕玻尔·阿尔法油井的事件序列

- 应急切断（ESD）系统的有效性；
- 起火；
- 爆炸；
- 事态加剧至附近设备；
- 事态加剧至其他区域。

终端事件的条件概率也有相同显示。这些都反映了挪威大陆架上比较现代化的生产平台的典型条件。

由于所使用的概率分布，可以观察到在帕玻尔·阿尔法油井事故中的事件序列不是很有可能会发生在北海的现代化平台上。预计这一特定序列的概率发生在帕玻尔·阿尔法油井之类的旧设施上的概率较高。

可以观察到帕玻尔·阿尔法油井的事件序列相当正确地反映在上述简单事件树中。就事件树而言，帕玻尔·阿尔法油井的特点可表述如下：

- 中等气体泄漏。
- 在启动应急切断(ESD)区域的操作员；
- 尽管如此，起火发生(可能直至爆炸发生后应急切断(ESD)还未启动)；
- 产生的爆炸不强烈(已进行倒退测算至 0.2～0.4bar)；
- 事态加剧(可能是由于碎片)首次至其他设备，导致油类起火；
- 事态加剧，因而随后就导致立管破裂。

尽管可以对帕玻尔·阿尔法油井事故进行很简单的建模，但通常较为重要的是需将碳氢化合物泄漏事件扩展至更详细的事件树中，因为只有这样做，才有可能对不同保护和/或详细系统和功能所产生的影响进行明确建模。下文例子显示了中等气体泄漏的详细事件树，见图 6.12 和图 6.13。

与图 6.11 中的简单事件树相比，此事件树具有相当多的节点数目，并包含操作员干预情况。实际上，它表明了在该事件树中包含了小范围的“循环”，就其意义而言，图 6.12 中的“操作员干预”是显示在高层次，在图 6.13 中则显示在较低层次。

图 6.12 显示了两棵子树：A 和 B。图 6.13 主要用于表述子树 B，但其实也包含了子树 A，其作为子树 B 的子集。

在子树 B 中有用于简化子树图的两棵附加子树。在故障树中所采用的传输逻辑通常可用于子树的传输。例如，这意味着需插入至图 6.12 中的子树 A 是图 6.13 中子树 B 的一部分，并可表示为“火灾探测成功”(实际上是“火灾探测失败”结果为“无”的情况)。

在事件树分析中，通常不使用传输符号。如果在图 6.12 和图 6.13 中的事件树用于计算，则传输是不能容许的，因为根据在事件树中的位置不同，各节点可能具有不同的概率。

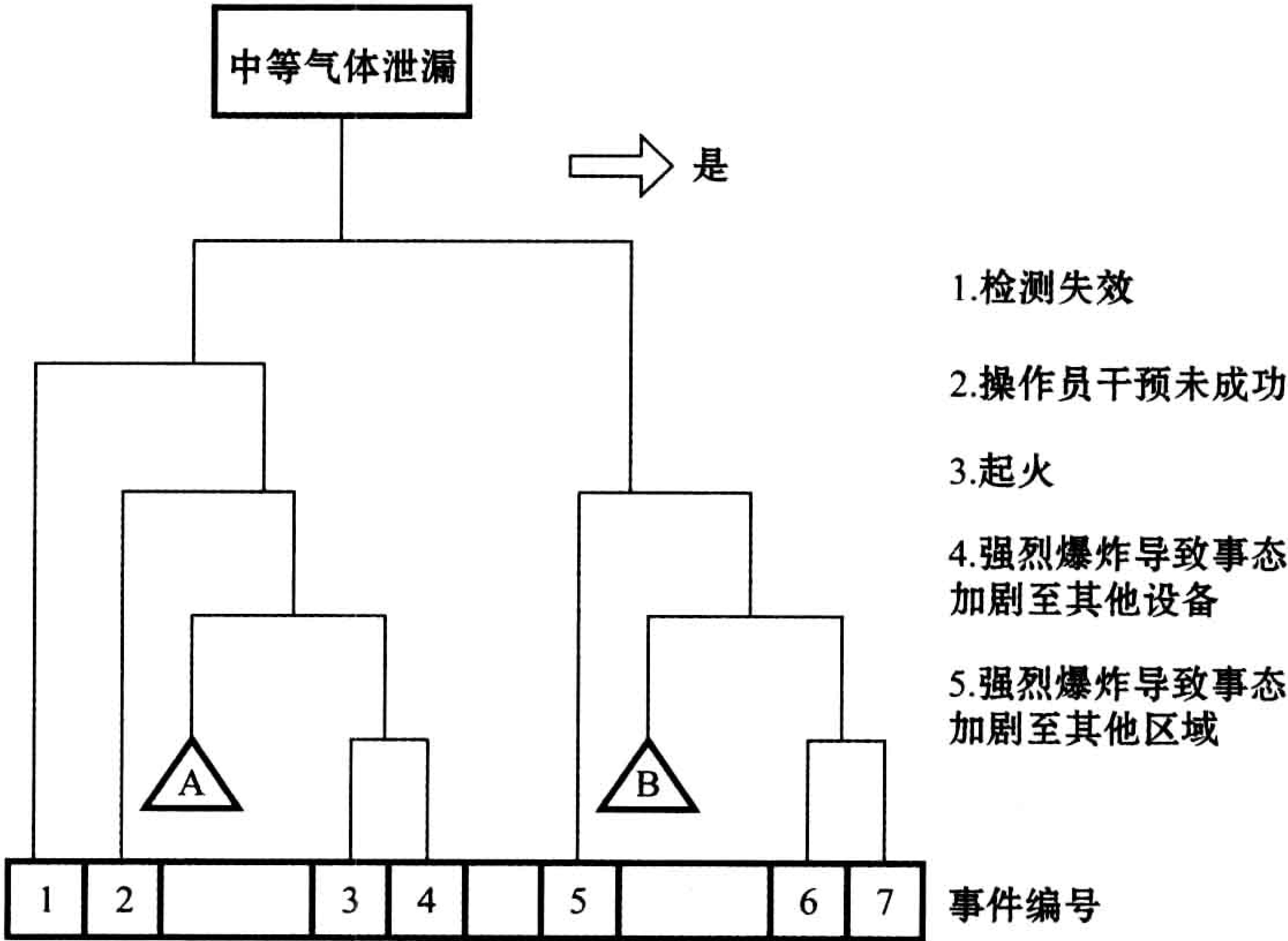


图 6.12　少量和中等气体泄漏的详细事件树

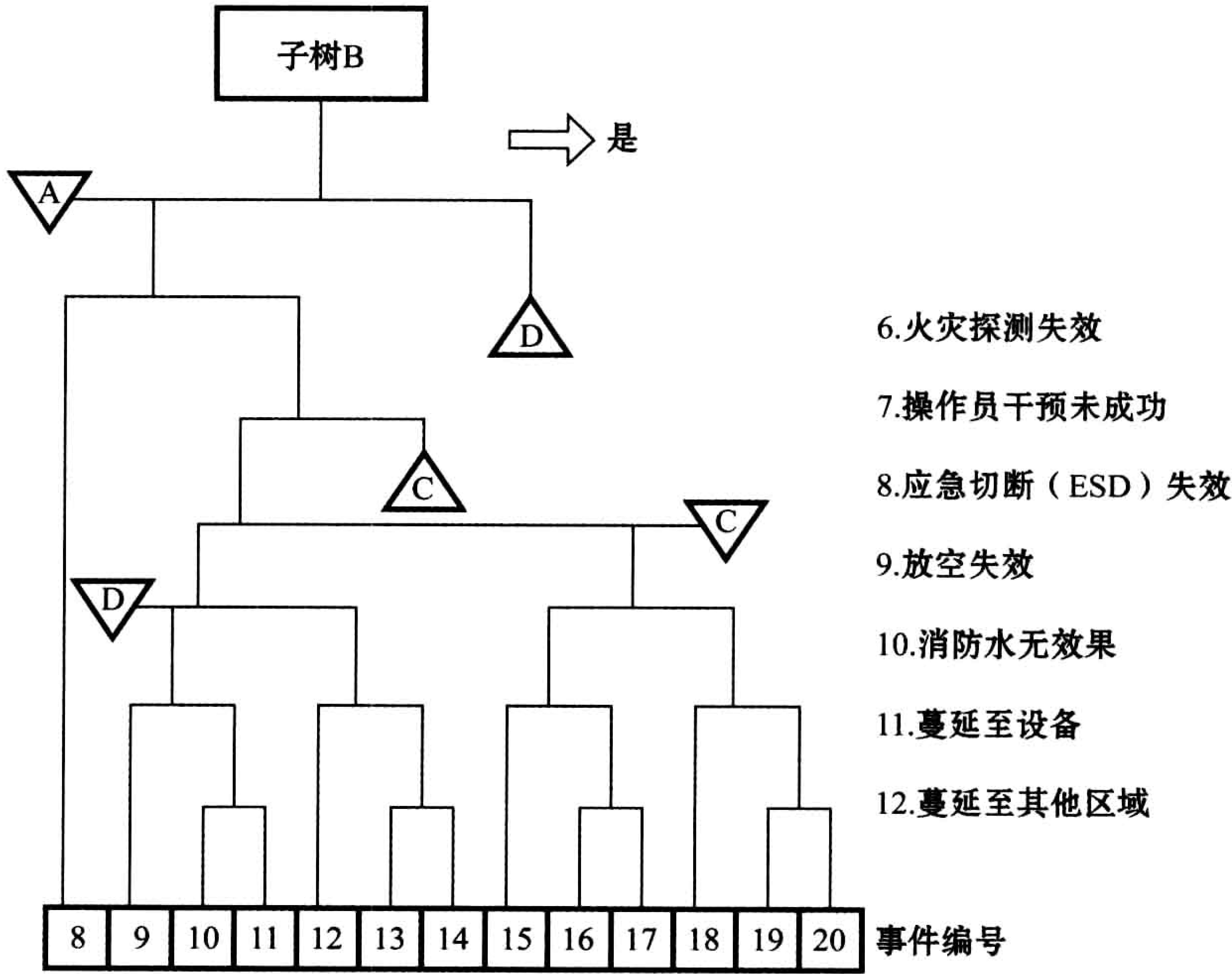


图 6.13　少量和中等气体泄漏详细事件树的子树

消防水激活(10 级)效果很大程度上是基于场景的总体情况,反映了前文所描述的,在事件树中所有事件的概率都是条件概率。

该详细事件树是真实案例,其实,它已应用于真实的详细量化风险评估中,并有了一种表达其曾使用过的方法。该事件树中有一方面有些令人遗憾,就是所谓“双重否定”的使用。其暗示着当“火灾探测失效”问题形成,分支“否”实际上就蕴涵着肯定结果:“火灾探测成功”。还有一个类似“检测失效”的双重否定。建议在构建事件树时避免使用如此的“双重否定”方式,因而并不推荐使用在图 6.12 和图 6.13 中事件树所用的措辞。

该事件树中的扩展版本(实际就是完整版本)共有 48 个节点,其意味着该事件树共有 49 个终端事件。

6.3.7　井喷事件树
Blowout Event Tree

在本节内所讨论的井喷事件仅涉及对人员和设备的影响。决定环境后果方面的建模超出了本书范围,所以不予详细讨论。

标准事件树通常用于描述相关意外事故场景。不论何种起因,同一棵事件树通常都用于所有井喷场景。该事件树如图 6.14 所示,并且下文将讨论各节点情况。

6.3.7.1　立即起火的节点
Node: Immediate Ignition

泄漏发生后,如果在前几秒(可能最多只有几分钟)内点燃泄漏,该起火行为就称为“立即”起火。在此类情况下,由于事态发展迅速,应急切断(ESD)隔离的效果通常是有限的。在此类情况下爆炸可能不太会发生,因为可能还没有足够时间形成爆炸气体云雾。但情况并非总是如此,在某些情况下爆炸云雾可能会迅速形成。帕玻尔·阿尔法油井事故可以说明该问题,因该事故很可能在泄漏开始后仅 20s 左右就发生了爆炸。

6.3.7.2　延迟起火的节点
Node: Delayed Ignition

如果花几分钟(可能长达 30min 时间)才点燃泄漏,则通常称之为延迟起

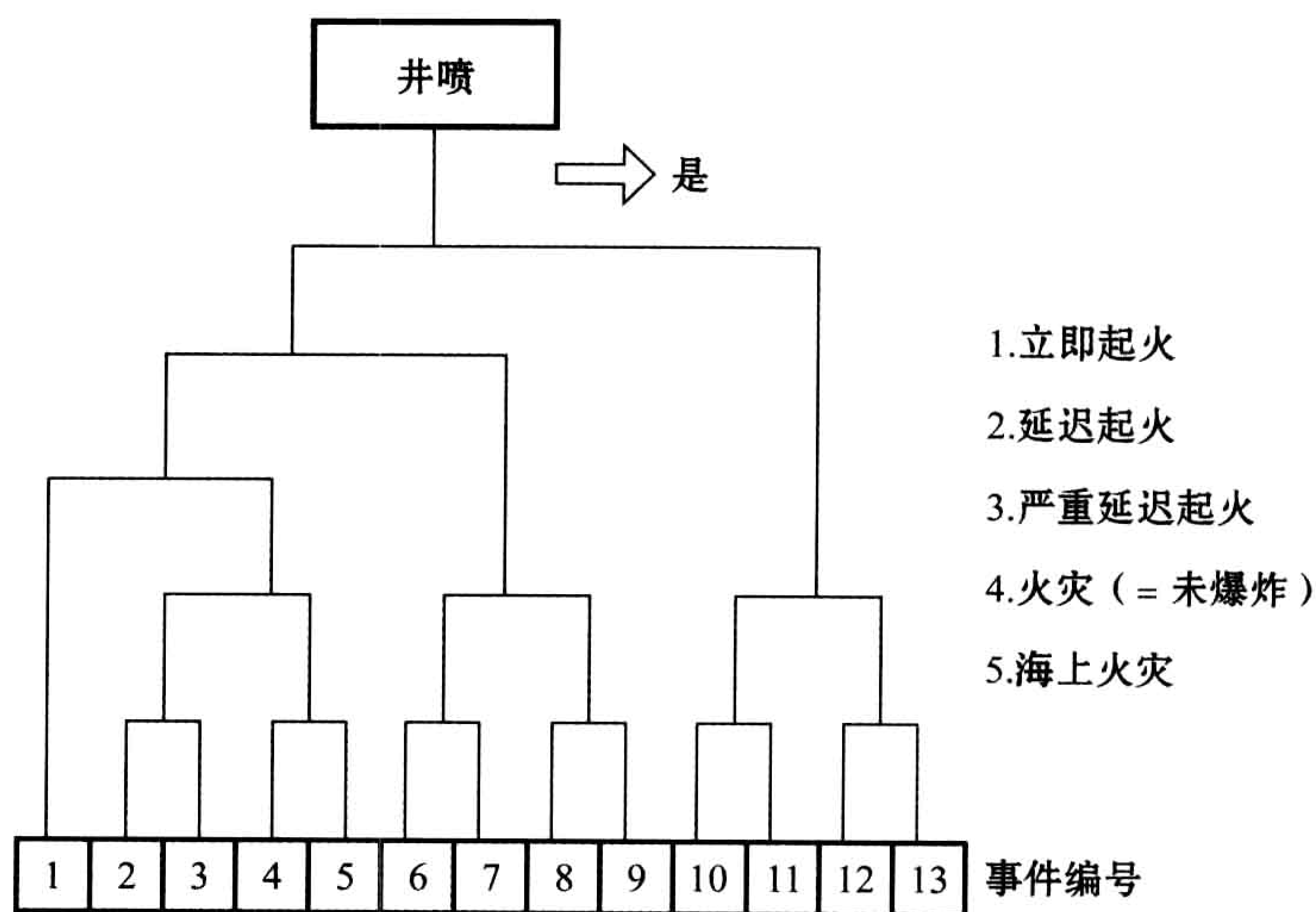


图 6.14　井喷事件树

火。在该情况下强烈爆炸的可能性非常高，因为具有相当规模的爆炸云雾可能在点燃之前已形成。

6.3.7.3　严重延迟起火的节点 Node：Greatly Delayed Ignition

严重延迟起火与井喷和立管/管线泄漏相关，其中可能会产生巨大云雾，并与起火源有一定距离。（例如，设想一个实际案例，当井喷开始 2～3d 后才起火，然后只能由工作船进来将失事平台拖离。）

如果未发生起火情况，那么就意味着井喷未起火。该含意为其后果主要是石油溢出和/或气体释放至大气中。泄漏或散布的云雾大小完全取决于井喷持续时间，其程度可能从几吨直至成千上万吨石油，或高达数十亿立方米的天然气。

6.3.7.4　火灾的节点 Node：Fire

离岸平台上的天然气火灾通常要比油池火灾更严重，后者将在下文第6.3.7.6中予以讨论。管理机构的要求和离岸设计惯例都通常关注于对油池火灾的防护，可能是认为对天然气火灾的防护是不可能或不切实际的。

天然气泄漏如果被迅速点燃，就可能会导致喷射火焰。该火焰有非常高的热量，并对火焰中的物体产生重大影响。这需要专门评估。有关喷射火焰尚无适当的正式定义或标准，因此，必须对真实火灾场景加以判断。还需确定充分防护喷射火焰的必要措施。

6.3.7.5 爆炸 Explosion

随着井喷出来的大量气体泄漏爆炸(为“火灾”节点的“无”分支)可能含有大量气体。最近的研发项目(SCI，1998)表明，在该情况下理论上会出现最坏情况的强烈爆炸。涉及爆炸发生的重要方面是事态加剧是否发生，是否事态加剧至另一部分，或至另一区域或甲板。这通常不直接表现在井喷事件树中，可能是因为火灾持续时间过长的原因，实际上一旦井喷起火，事态加剧是肯定的。如果因为爆炸而瞬间发生事态加剧，该早期事态加剧可能会更加关键，尤其是如果事态加剧发生在撤离完成之前。在这情况下，该场景可能类似于帕玻尔·阿尔法油井事故。从事故记录中只有一个相应严重程度的情况(37 人死亡事故)，即在 1970 年美国墨西哥湾井喷所导致的爆炸和火灾。

6.3.7.6 海上火灾的节点 Node：Fire on Sea

在离岸平台发生井喷的情况下，总有可能有一些石油未在空气中完全燃烧而溢出至海面上。然后，这些油会在海面上燃烧。如果在海面上燃烧的油量达到一定程度，那么甲板底部辐射负荷可能会相当高。烟雾的产生也可能会妨碍顺利完成逃生和撤离。

空旷处的油池火灾可由燃料表面蒸发率控制。液体吸收火焰和蒸发的能量。蒸汽将与携入的空气混合，并因浮力作用而上升。然后进一步被加热至起燃，并且反应产生热量。接着，燃烧气体辐射能量，直至达到仅与周围环境热量交换的某一低温。涉及安全的油池火灾主要关键特点有：

- 油池火灾的持续时间；
- 油池火灾的程度，即火焰高度和直径；
- 火焰外围物体的辐射热负荷；
- 火焰围住物体的热负荷。

这些特点完全取决于溢油发生位置的几何条件。

当油池火灾发生在空气供给有限的密闭区内时,实际空气供给程度将决定该油池火势的强度。

理论上,海上火灾也可能是由于海底处井口的井喷所引起。通常只有当平台上的设备溢流起火后才会发生海底井喷燃烧。只有平台内部的气体才有可能起火,因此气体占比会影响起火的概率。

6.3.8 立管/管线的气体泄漏 Gas Leak from Riser/Pipeline

6.3.8.1 泄漏和溢流条件 Leak and Outflow Conditions

高容量天然气/石油管线突然破裂将导致高度可燃物质大量释放至空中(即海平面之上)。存储在该管线内的能量可能是巨大的,碳氢化合物的意外释放可能会引起严重的机械损坏和/或火灾。为评估危险,起火时有必要知道溢流的时间相关率和溢流特性。具体例子可见图 6.15。

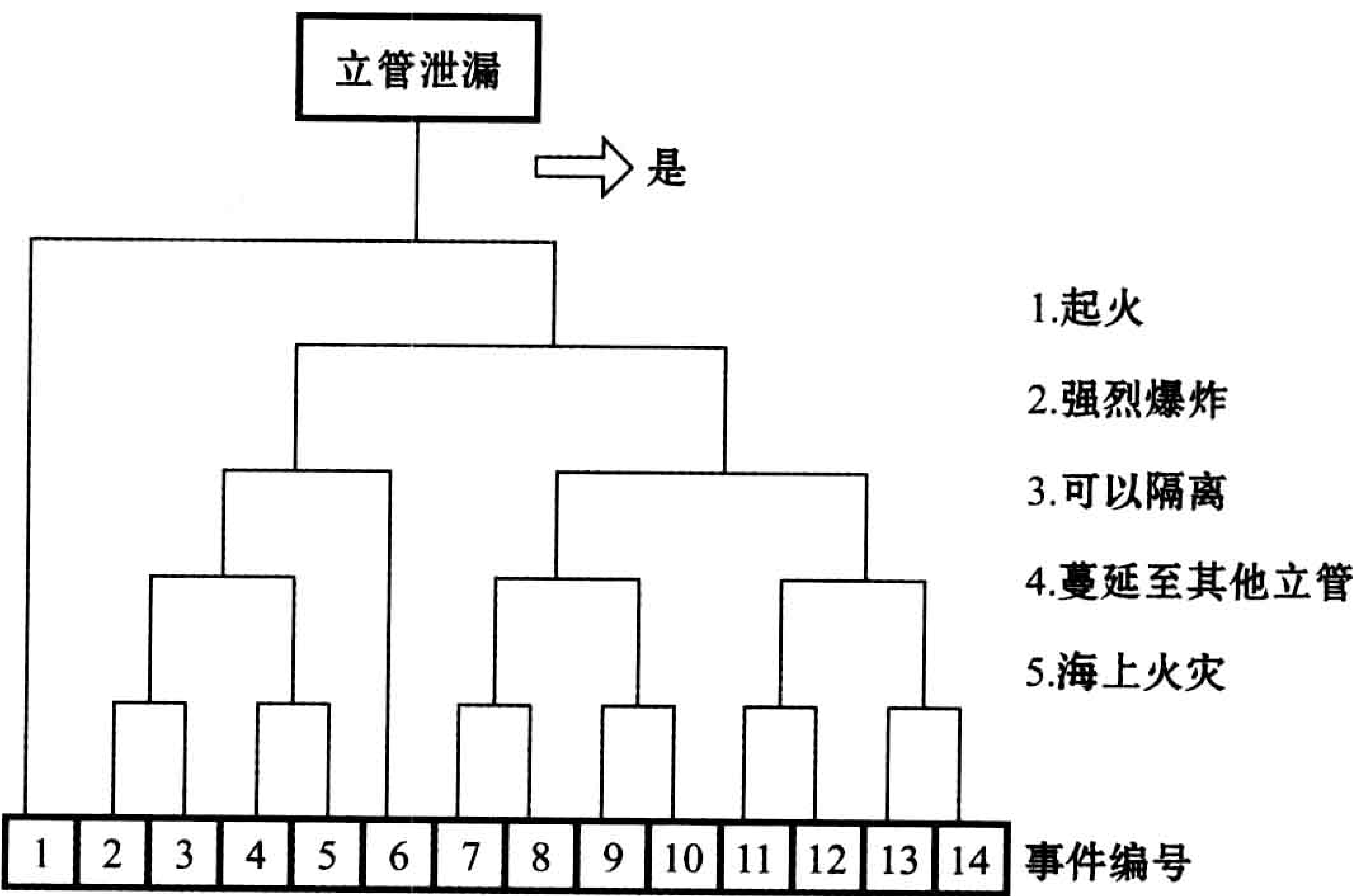


图 6.15 立管泄漏事件树

立管泄漏的事件树通常很简单，因为风险降低的可能性有限。在这种环境下，控制风险的最好办法就是防止破裂实际发生。

6.3.8.2　起火 Ignition

如果立管在海平面之上破裂，则气体泄漏的流量将会非常高，这已在第5.3.3节中指出。因此，在很短时间内该气体云雾的规模会相当广泛，实际上可能达到的广泛程度能导致云雾含量大部分都高于爆炸上限(UEL)，因此，起火可能性就不大。

从石油立管泄漏的起火与天然气泄漏完全不同。原油相对来说是不可压缩，并且溢流条件更要受到摩擦的影响，也就意味着膨胀将仅限于最初的“喷涌”。因此，起火的可能性非常有限。

6.3.8.3　溢流隔离 Isolation of Flow

1988 年发生帕玻尔·阿尔法油井事故之后的最初几年内，在天然气管线上安装了相当多的海底隔离阀，在现有管线上安装了约 50 只阀门。海底阀门将作为阻止气体从管线溢出的屏障，即使泄漏发生在立管上。因此，如果安装了这种屏障，有可能发生的火灾不会持续很久。帕玻尔·阿尔法油井事故发生之后，设在平台上的应急切断(ESD)阀受到了许多关注，特别是在不同意外事故情况下的继续有效性。然而，海底阀门的位置提供了最广泛的保护。

海底隔离阀通常位于距平台 200～500m 处。其原因如下：

- 降低阀门遭受从平台上掉落物体损坏的可能性。
- 阀门不仅能阻隔立管泄漏，而且还能阻隔最靠近平台的管线部分。该部分显然也是管线最有可能发生泄漏的地方。

该位置的不利之处是阀门与平台之间的管线/立管部分设备将更多，因此也意味着有更大风险。图 6.16 显示了与浮式生产储卸装置(FPSO)设施相接的天然气输出管线上安装的海底隔离阀位置。对于此类船舶，管线和船舶之间连接通常是通过柔性出油管道，其泄漏概率与钢制立管相比要高一些。因此，此类状况下通常都是在海底安装隔离阀。

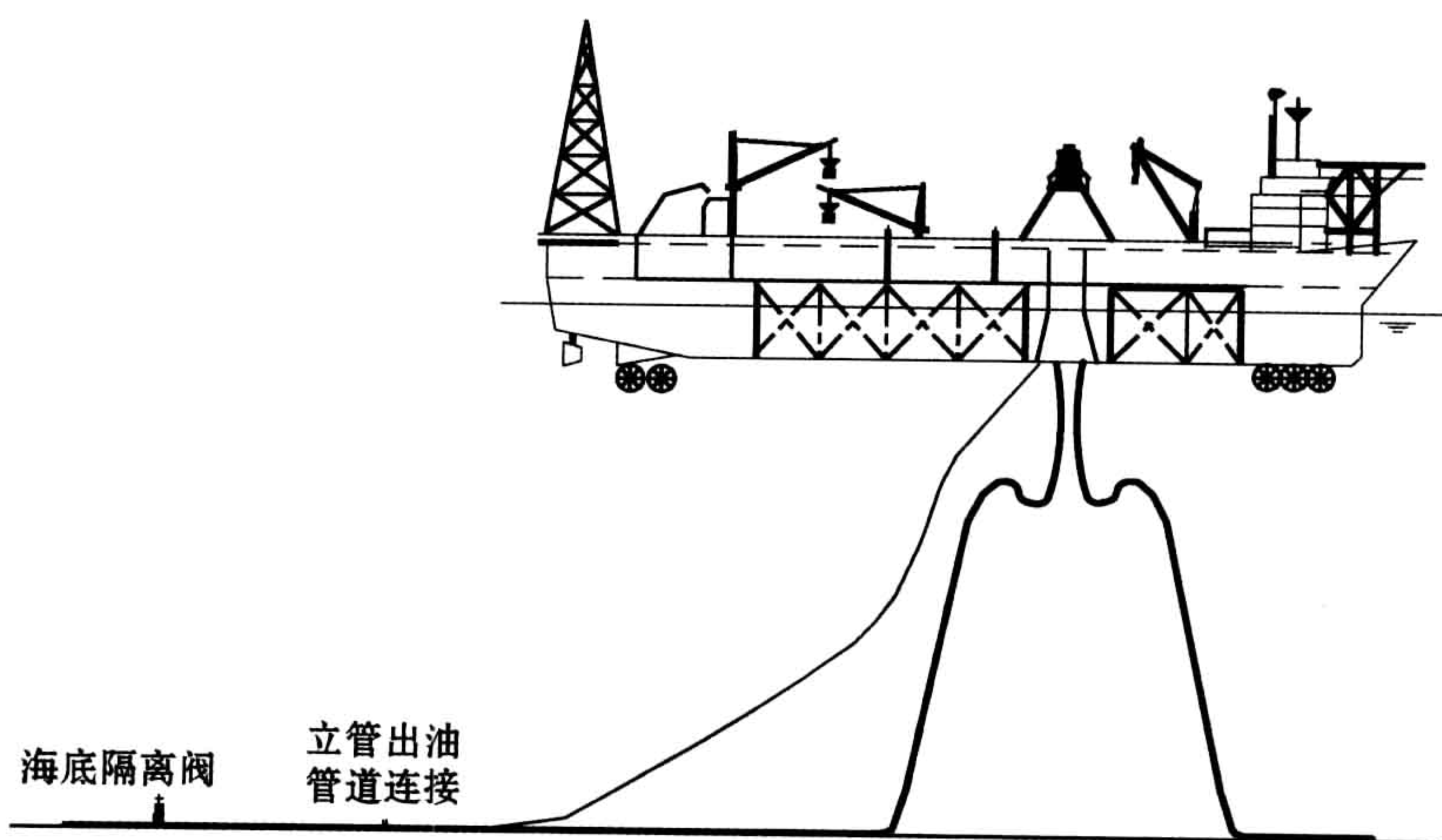


图 6.16 天然气管线上海底隔离阀的位置

还必须要考虑到阀门本体也有可能会泄漏。海底阀意味着管线上会有一些潜在的泄漏点。这就意味着阀门本体也可能会发生气体泄漏,显然这样的泄漏不能由阀门来阻止。事实上可以预期在阀门安装后的泄漏频率估计要比安装前更高,因此,阀门与平台之间需保持足够远的距离非常重要,可避免由于阀门泄漏而在平台周围产生气体云雾的可能性。

如果安装了海底阀门,那么在作业阶段就必须把重点放在维持阀门的高度可用性上,从而将发生事故时阀门关闭失效的概率降至最低。

6.3.8.4 蔓延至其他立管 Spread to Other Risers

如果意外事故的事态加剧至其他立管,其后果可能更严重。火灾荷载范围可能非常广泛,如果火灾延续时间长,那么,第二根立管破裂的可能性相当高。这也在帕玻尔·阿尔法油井事故中得到了印证(见第 4.7 节)。

6.3.8.5 海上火灾 Fire on Sea

海面上的火灾是相当重大的事故,因为除顶边结构受损外,支撑结构也可能会受损,如帕玻尔·阿尔法油井事故所示(见第 4.7 节)。

6.4　屏障之间的关联性分析
Analysis of Dependencies Between Barriers

在石油工业中定量风险分析方式已实施了多年，这使得屏障之间的关联性综合分析成为了不可能。屏障系统和要素的可靠性分析是在有限范围内作为事件树中输入节点概率进行的。通常是把每个节点隔离后进行可靠性研究，而且一般只涉及表面形式，并未考虑受到公用系统的影响。

有个例外就是当使用高完整性压力保护系统（HIPPS）时，通常就会综合分析屏障，其可靠性至关重要。然而，该分析一般只局限于压力保护功能。

在核电厂的量化风险评估研究中，很常见的是先分析大范围的事件树和故障树，然后可能详细分析关联性。最常使用的工具为 RiskSpectrum® 软件（Relcon，2006）。此分析工具包含普通事件树和故障树，但这些事件树都能转化为故障树，从而使所有故障树都能用于屏障，然后就可能整合成一棵巨大的普通故障树。根据这完整的故障树，可详细分析关联性，包括使用常规技术来分析割集、共同模式失效以及重要性计算。RiskSpectrum® 分析工具有以下优点：

- 结合共同模式失效，可能会发现关联性；
- 可能会计算部件、系统和失效的重要措施；
- 可能会用分析来识别屏障生效的要求；
- 如果屏障系统不能利用，可能会用分析来确定需要哪些补偿措施。

试探性研究的完成是为了证明应用 RiskSpectrum® 工具（Bäckström，2003）的优势。对于所涉及海上设施问题，就预防不受控制的火灾事态加剧而言，下文所述系统被认为最为重要：

- 气动动力供应；
- 两个指定的电力供应电路。

使用传统的定量风险分析一般永远不会发现此类结果。

试探性研究进一步发现了共同模式失效的作用低于预期。由于这是相当有局限性的试探性研究，并不能确定该观察是否具有广泛的适用性。

通常使用 RiskSpectrum® 软件工具来分析物理屏障要素。这也是试探性研究中所受到的局限性。另一方面，相关规范要求平行考虑物理及非物理屏障系统和要素。这将有可能延伸了 RiskSpectrum® 软件工具的分析作用，也将人员和组织屏障系统和要素纳入其中。

6.5 事件序列分析 Event Sequence Analysis

6.5.1 时间关联性 Time Dependency

在构建事件树时通常假定为是“单向”的时间发展。对于气体泄漏，通常遵循如下顺序：

- 泄漏；
- 气体检测；
- 隔离；
- (潜在)起火；
- 火灾检测；
- 消防；
- 次级围护损失。

如果场景完全未受控制，真实场景的发展很少会有这么简单。很多时候会出现循环情况，其中包括发生二次泄漏、爆炸和火灾事态加剧等。实际上，这都不能综合到事件树中。

因果分析是另一种形式的事件树，它能显示各步骤之间的时间延迟，并在一定程度上进行耦合或组合。然而，时间序列仍然认为是“单向”的。另一方面，该事件树模式的最大好处是易于对非分析人员传递假定的事故序列。

通常认为用于量化风险评估的事件树是“静态”的，就事件树的逻辑意义而言，其耦合等都是由分析师在进行实际分析前所设定的。替代静态事件树的是动态事件树，它可以通过编程来改变其逻辑和结构，以反映意外事故建模的发展情况。在商业上，只有一个程序包适用于该动态树，即由伦敦的环境资源管理公司（原四元素公司）开发的 PLATO® 工具（Morris, Miles and Cooper, 1994）。据说 PLATO® 工具用作意外事故发展的模拟器，但也许能更好地解释为动态事件树的发生器。

但动态是有代价的。在事件树中通常只有 50 个终端事件，可是在动态分析中就可能会有 5 000 个终端。

根据在程序开发中自动执行的事件后果计算的结果，PLATO® 中的动态事件树发生器将开发出事件树中的各分支。为了使计算时间符合实际情况，就每个终端事件的后果计算而言，过去大量的结果显然已极大地限制了其能力范围。在动态树表示法与简化后果计算之间，或更静态（及更简单）事件树与更先进后果计算之间是很难做出选择的。如果使用过于简化的后果计算，动态事件树的益处可能会完全丢失。独立审核（Jones and Irvine, 1997）发现用于燃烧的模型不仅适合，而且还能十分详细地说明海上设施的应用程序。另一方面，可能对此也有争议，自 1997 年以来，量化风险评估研究越来越多地使用了计算流体力学（CFD）的计算方法。

尽管对事件树在事故序列中怎样动态建模有严格限制，但该程序仍被广泛使用。但应该指出的是，进一步的研究和开发工作有利于改进事故序列的建模。

6.5.2　事件树建模中的节点序列
Node Sequence in Event Tree Modelling

事件树建模中的节点序列是最难以处理的问题之一，事实上可能会说并没有放之四海而皆准的真理。该问题可能似乎并不重要，因为根据式 6.2，节点概率总是呈成倍增加趋势。但事实远非如此。节点概率是条件概率，因此序列仍是相当重要的。

在该领域内并没有绝对规则可言，因其都是取决于所涉及事件树结构、安全系统及功能。建议应使用的规则如下：

- 如果系统和操作在开发中具有时间顺序，那么在事件树中就使用相同序列来表示；
- 如果激活某系统或功能会对其他系统的成功产生作用，那么在事件树中应首先考虑该系统。

请仔细分析下面例子：检测到气体泄漏后通常会导致紧急停机，从而隔离生产厂的各区段，但同时也切断了所有电气设备的电源，其中可能也包括起火源。因此，起火节点需跟随检测节点，若反之，就会导致涉及泄漏起火的严重过度预测风险。

6.5.3 定向建模 Directional Modelling

标准事件树的另一个局限性是如果考虑不同火焰方向，该事件树就会变得太复杂（主要适用于喷射火焰）。事件树通常采用“典型”方向、或最可能方向或最糟情况下的方向进行建模。但应该如何做出决定？就管道系统上法兰处气体泄漏而言，沿法兰四周各个方向都同样有可能产生泄漏。

然而，上文提到的动态事件树的发生器 PLATO® 也能处理由于不同方向火焰导致的事态加剧情况。

一些分析师已选定了该方法的替代方案，为了提供真实的近似模型，他们使用以 6 个不同（笛卡儿）方向建模的事件树。该方法的优点是使用电脑凭借“标准”事件树可实现定向建模，尽管导致事件树数量变得非常多。软件 ASAP® 执行该建模，见附录 A。

6.5.4 人、技术和组织 MTO

人、技术和组织（MTO）分析主要是开发用于调查意外事故和事件的技术。同时，亦可应用于分析目的，因而简要概述涵盖了这些内容。值得注意的是，

人、技术和组织(MTO)调查是挪威石油安全局用来调查挪威大陆架意外事故的主要调查技术。

综述人、技术和组织(MTO)分析的资料寥寥无几,Tinmannsvik et al.(2005)是为数不多的资料之一,下文概述均以此为依据。基于核工业的人为绩效提升系统(HPES),该方法由吉恩-皮埃尔・本托(Jean-Pierre Bento)开发。人、技术和组织(MTO)分析基于以下 3 个方法:

1）通过使用事件和原因图进行结构化分析。

2）通过描述各事件已偏离早期事件或普通惯例进行变化分析。

3）通过确定技术和管理失效或缺失屏障而进行屏障分析。

图 6.17 显示了在事故调查时使用的人、技术和组织(MTO)分析工作表。人、技术和组织(MTO)分析的第一步是以水平方向展开事件序列,并在框图中说明事件序列。然后,分析师应该确定每一事件技术和人力的可能原因,并将其以垂直方向插入图表的各事件中。

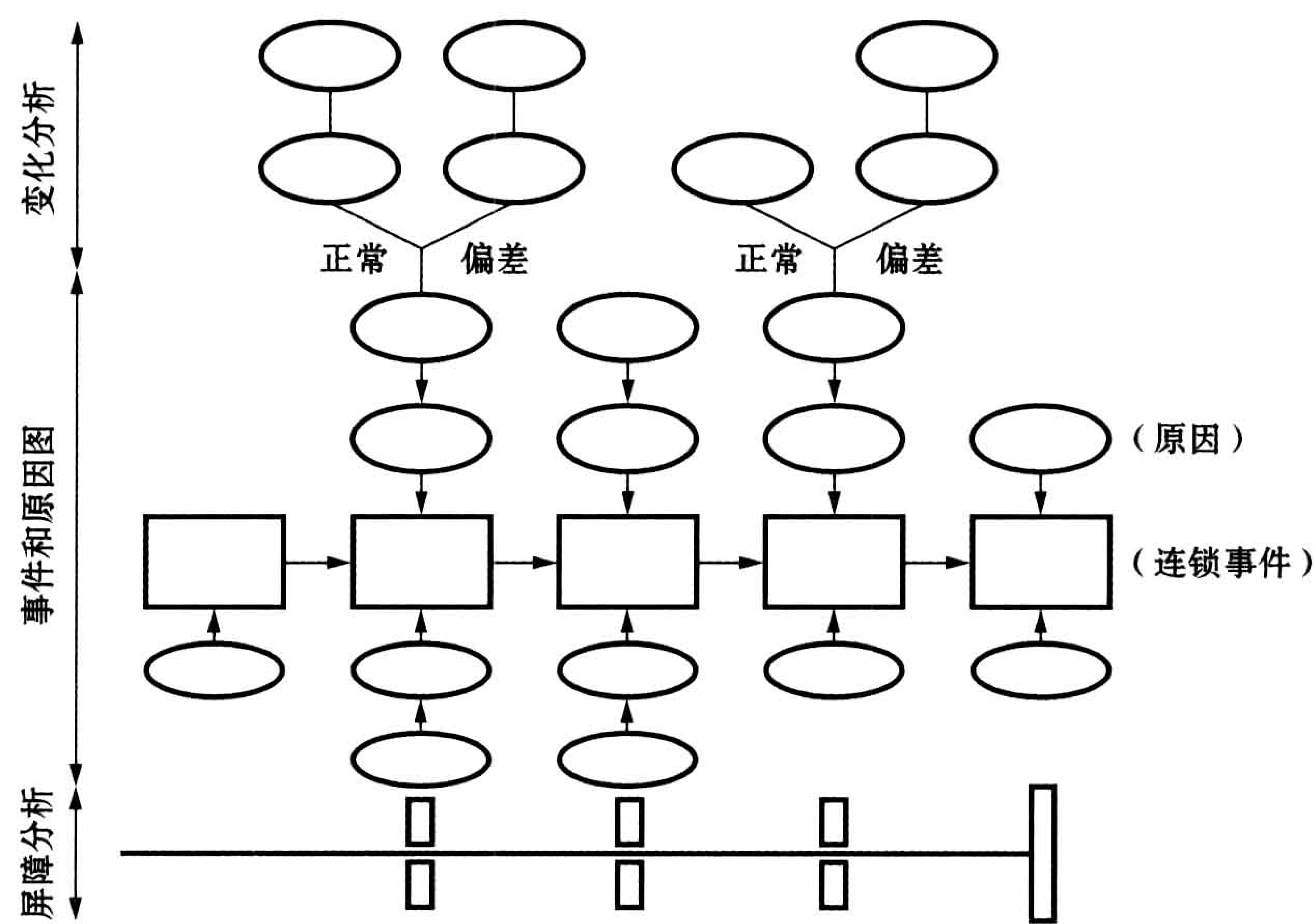


图 6.17　说明性的人、技术和组织(MTO)图表

事件序列的开发通常称之为“时间线分析”，即事件序列及其时序的分析。这是事故调查中的一个步骤，也是许多调查方法通常使用的步骤。

下一步是做出变化分析，即评估事件进展过程中各事件怎样偏离正常情况或普通惯例。图 6.17 也说明了正常情况和偏差现象。此外，确定在事故进程中哪些技术、人力或组织的屏障失效或缺失。所有缺失或失效屏障都显示在图中各事件下面。所需分析的基本问题如下：

- 什么工作可以阻止事故序列的延续？
- 为了防止意外事故发生，组织在以前应该完成哪些工作？

在人、技术和组织(MTO)分析中的最后(也是最重要的)一步，就是要确定和提出建议。这些建议应尽可能实事求是和具体明确，并可以是涉及技术、人力或组织方面的。

为了能对事故原因进行趋势分析，基本原因分类系统也已开发完毕。各种原因可分为以下几类：

- 工作环境；
- 营运组织；
- 改变管理的例程；
- 海上设施管理；
- 人机界面(MMI)；
- 工作进度表；
- 通信；
- 程序与指令；
- 监督；
- 工作实践；
- 能力与培训。

应指出的是人、技术和组织(MTO)分析并不适合于进行定量分析。图 6.18 和图 6.19 所示为实际案例中完整的人、技术和组织(MTO)图表。

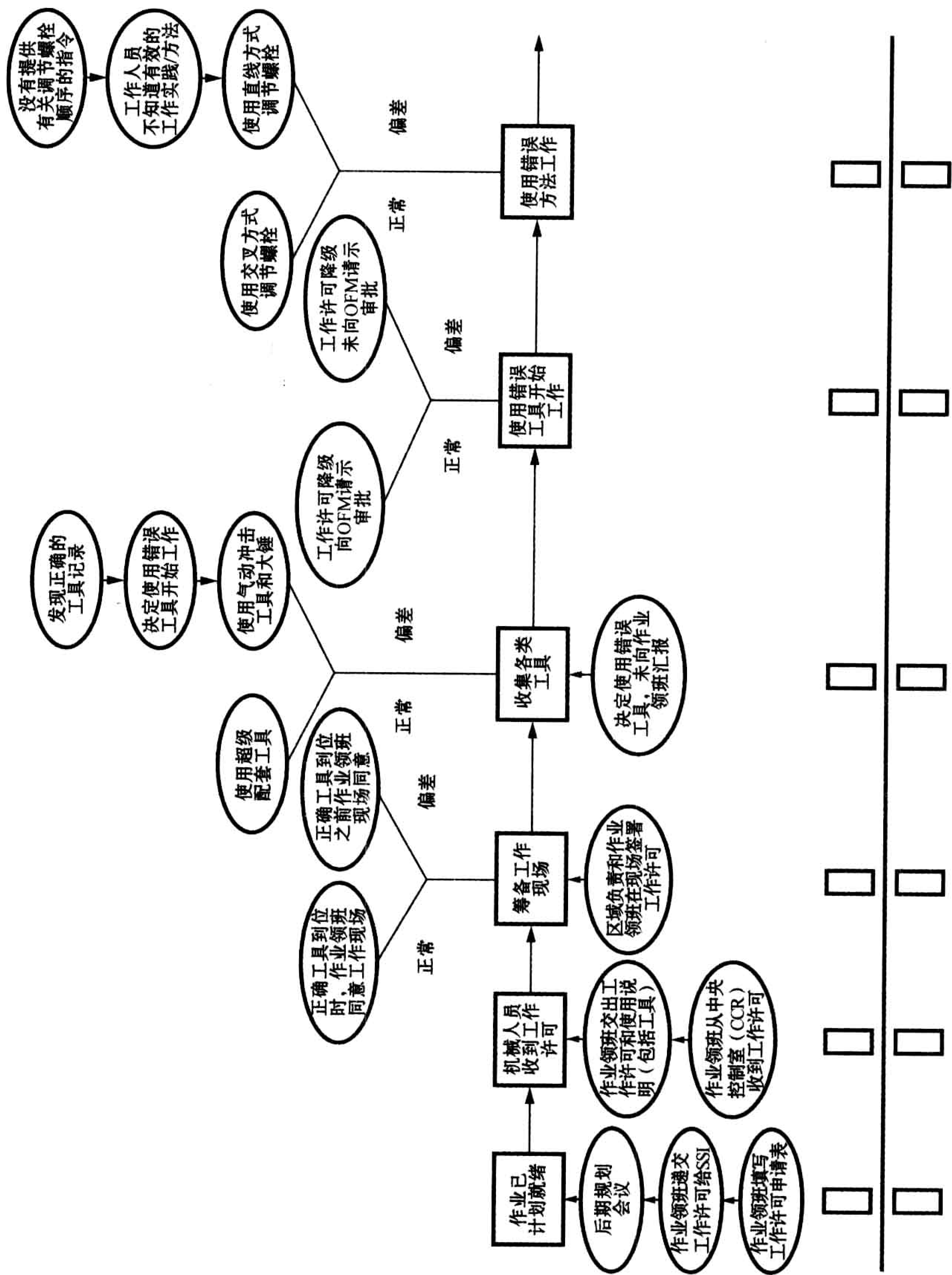


图 6.18　“热拴接”事件的人、技术和组织(MTO)图(第 1 部分)

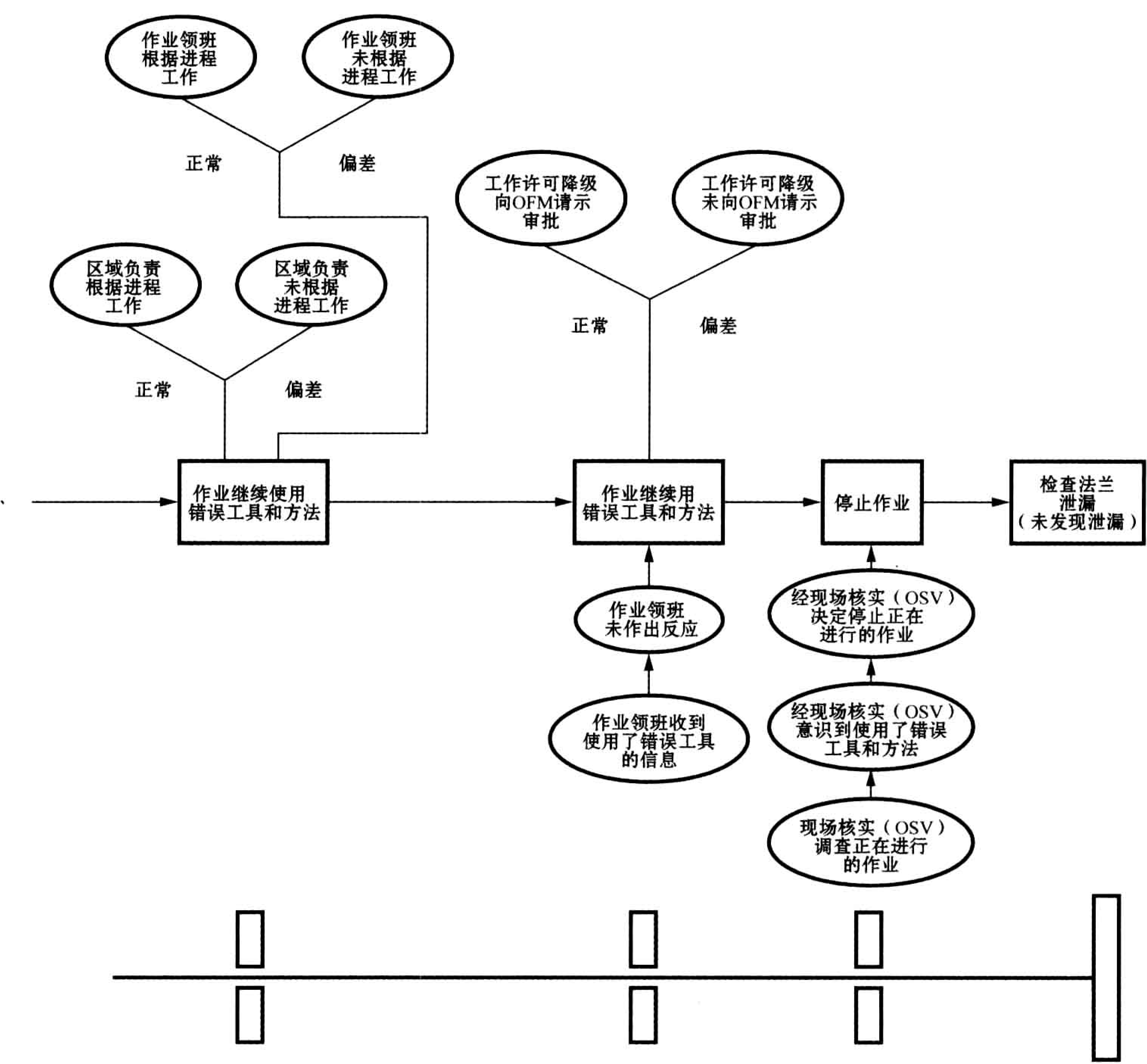


图 6.19 “热拴接”事件的人、技术和组织(MTO)图(第 2 部分)

6.6 碳氢化合物泄漏建模 HC Leak Modelling

涉及石油和天然气的意外场景建模始于泄漏媒介。这可以源自许多方面，例如：

- 管道及相关配件；
- 船舶；
- 管线/立管。

泄漏媒介形态是次级重要的方面：

- 1 种形态溢流，即气体或油类（液体）形态；
- 2 种形态溢流，即通常为气体和油类（液体）相混合；
- 3 种形态溢流，即气、油、水。

必须使用适合不同形态组合和不同资源（主要反映在从船舶或从管线或管段溢出之间差异）的不同模式。各模式主要目的是确定作为时间函数的流速。

6.6.1　泄漏统计 Leak Statistics

挪威石油安全管理局（PSA）已在过去 6y 内为挪威大陆架收集了相当多的经验数据，特别是碳氢化合物从生产设备和营运中泄漏方面的。PSA（2006a and b）刊登了最新年度更新资料。详细资料仅限于挪威，该摘要报告也以英文出版。Vinnem et al.（2006b）探讨了该科学方法。

实际上，从 1996 年至 2005 年的 10y 期间挪威大陆架上所有海上设施的数据都可获得。从 2001 年至 2005 年期间的数据质量相当好，应作为主要数据的基础。对位于挪威地区所有泄漏超过 0.1kg/s 泄漏率的所有海上设施概述如图 6.20 所示。

所涉及几个参数，在该项目的数据内都已规格化，对于碳氢化合物泄漏是指海上设施数目和海上设施安装工时数。海上设施可以分为下列几类：

- 海上固定生产设施；
- 海上浮式生产设施；
- 复合构件、桥接海上生产设施；
- 通常无人值守海上设施（海上生产设施）；
- 移动部件。

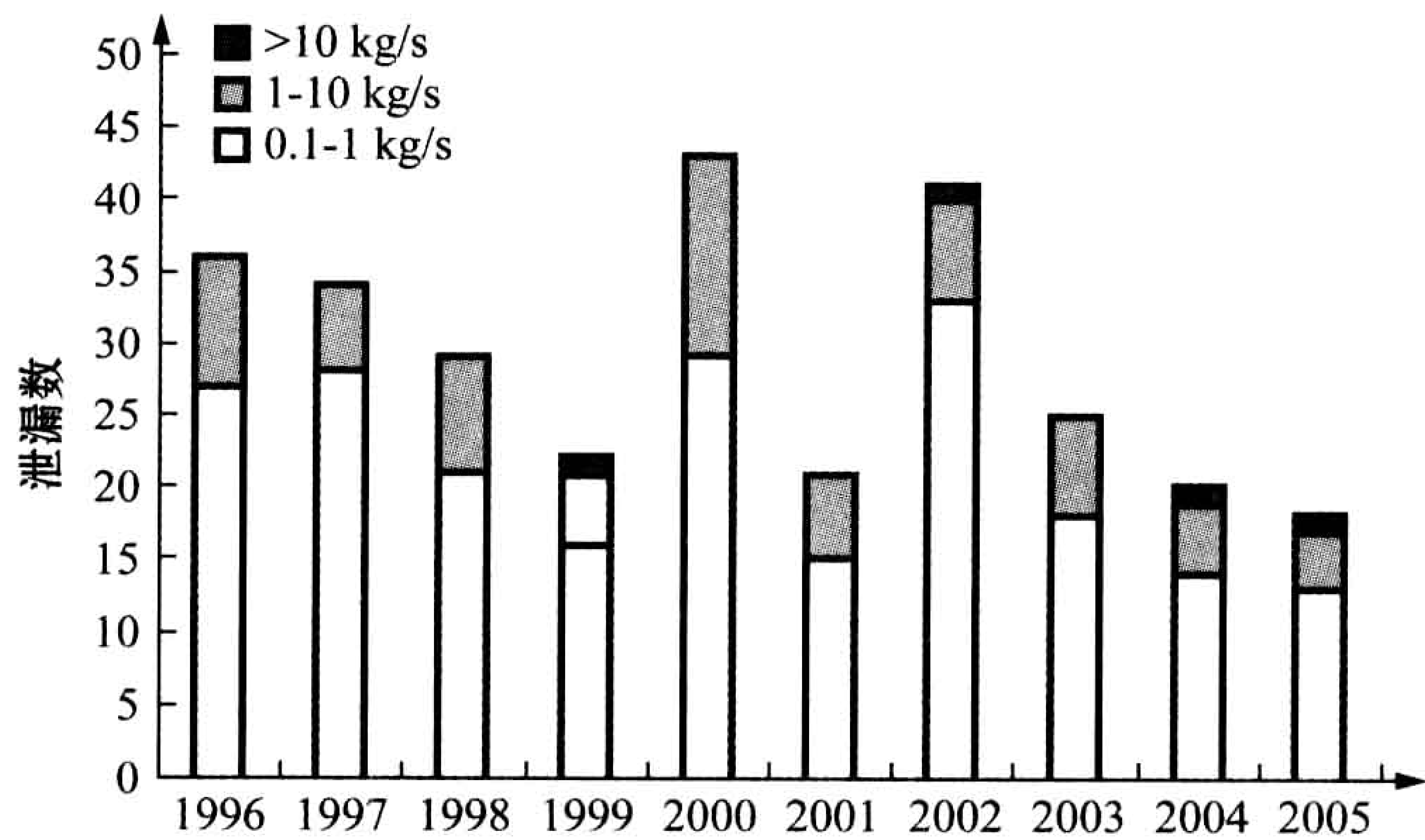


图 6.20　挪威地区 1996 年至 2005 年期间碳氢化合物泄漏大于 0.1kg/s 的概览

应该指出的是复合构件比较特别。可能有两至十多个桥接海上设施，其中一些可能在理论上讲是用于处理碳氢化合物的。但就规格化而言，复合构件只能算作一个海上设施，而不论有多少桥接设施，也不管有多少是用于处理碳氢化合物的。

图 6.21 提供了整个挪威地区以每一安装年表示的所有海上设施平均累积泄漏率分布状况。

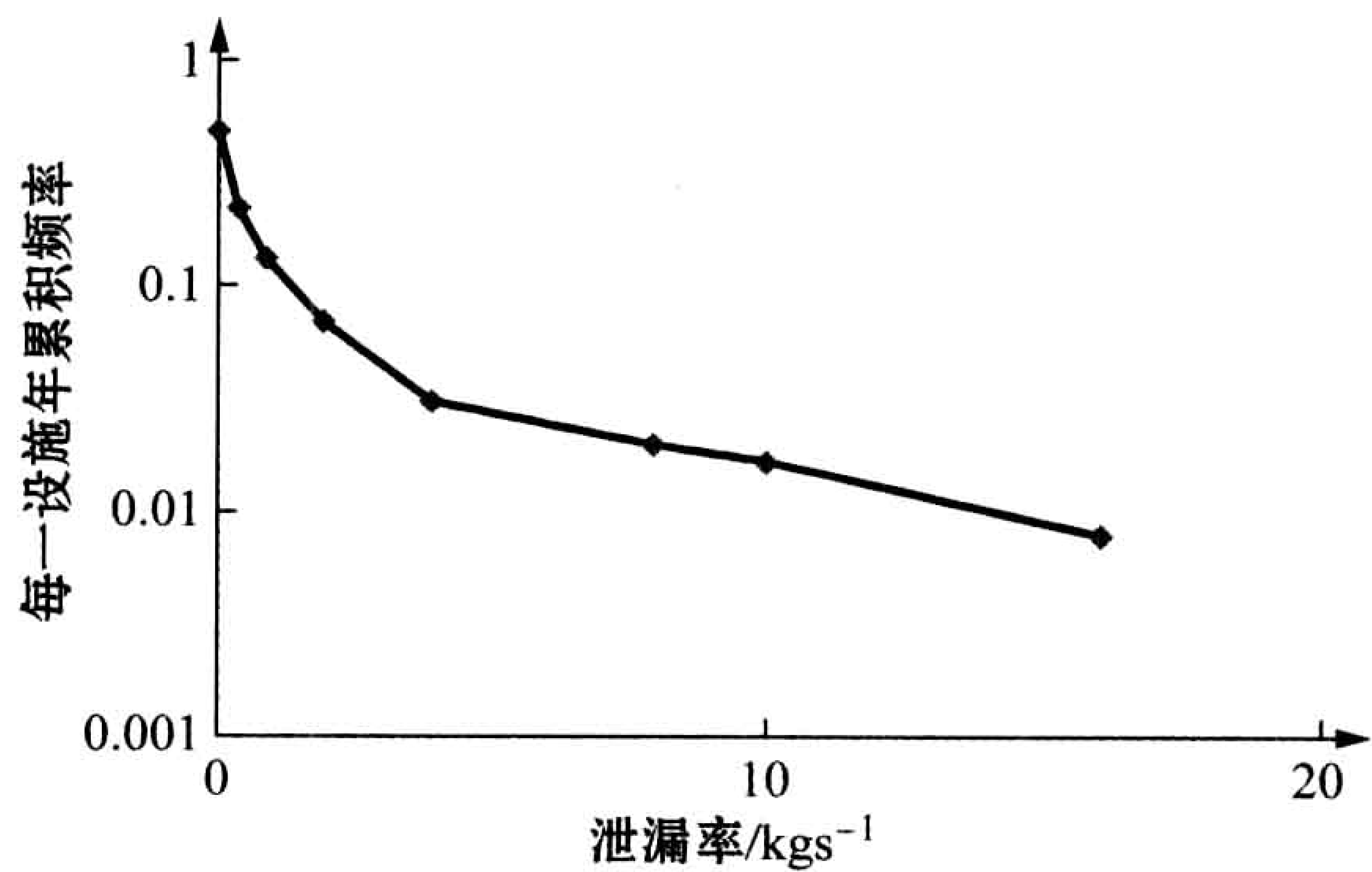


图 6.21　2001 年至 2005 年期间挪威地区泄漏的泄漏率分布状况

按海上生产设施分类的每一设施年的泄漏频率如表 6.1 所示。可以观察到，固定生产设施泄漏总频率大于 0.1kg/s 的为 0.31 每一设施年，而浮式生产

设施的相应频率为 0.57,复合构件的频率最高,为每一设施年 0.74。通常无人值守海上设施的频率很低,只有 0.03。

表 6.1　每一设施年泄漏频率概观

海上生产设施	0.1～1kg/s	1～10kg/s	>10kg/s
固定生产设施	0.25	0.047	0.0079
浮式生产设施	0.44	0.12	0.012
复合构件	0.46	0.26	0.020
通常无人值守设施	0.029	0	0

风险等级项目(PSA,2006)还包括与英国作业的比较。图 6.22 显示了整个英国和挪威地区泄漏大于 1kg/s 的数量比较。

为了消除可能的漏报,所以将 1kg/s 的泄漏率作为取舍点界限。虽然有不确定的其他原因无法消除。由英国健康与安全管理局(HSE)收集的数据有一些附加分类标准,但该标准并不用于挪威的数据收集,由于泄漏持续时间很短和/或泄漏总量很少,所以产生这些附加取舍点界限。这意味着有些超过 1kg/s 的泄漏也没有统计在内,从而使得比较图 6.22 不是很精确。

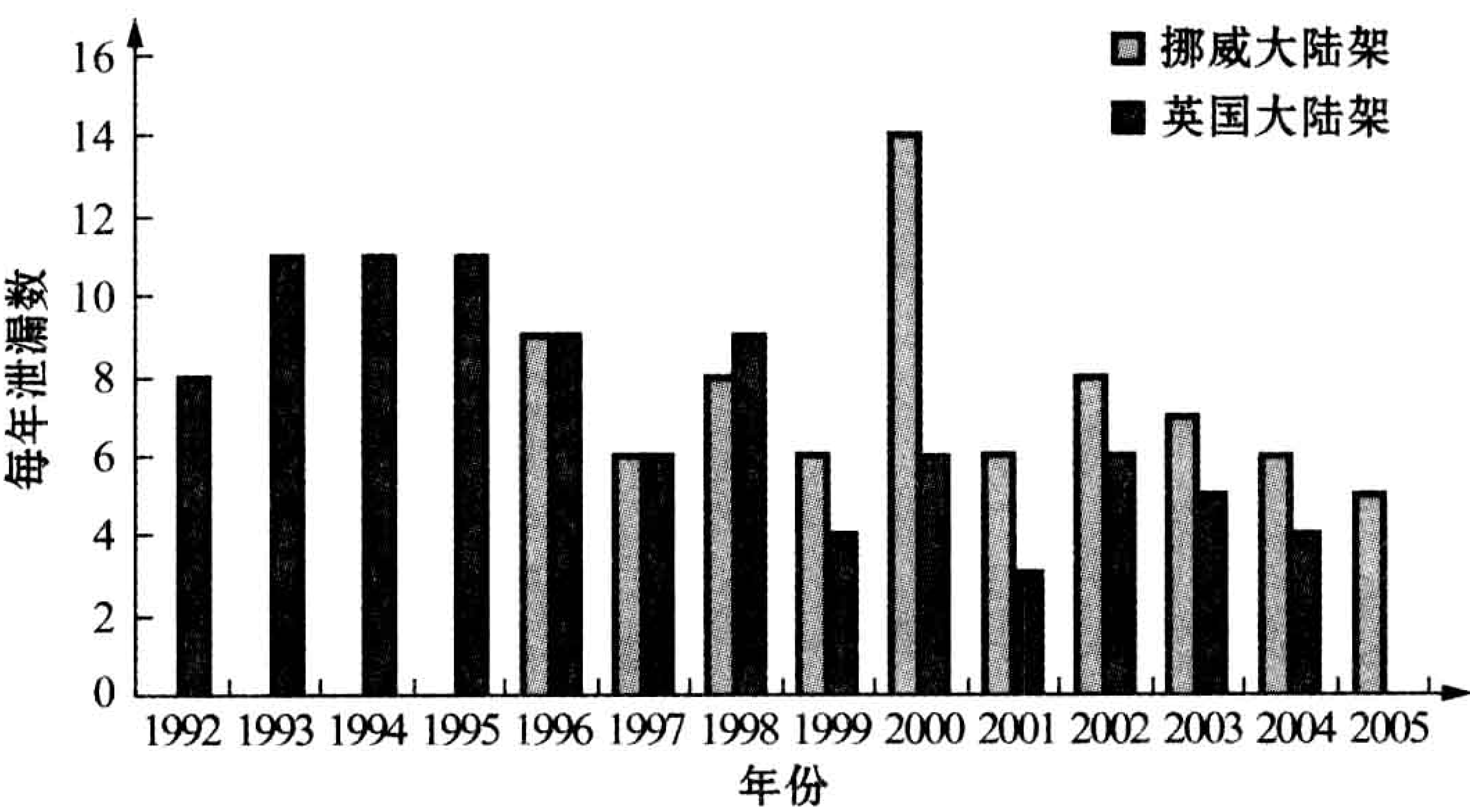


图 6.22　英国和挪威地区泄漏大于 1kg/s 的数量比较

为弥补上述不足,风险等级项目在 2005 年实施了一项任务。该任务着重于 59°N 以北的海上设施,因为在该区域的英国和挪威地区的海上设施规模和复杂程度相类似。该项目给出了每一设施年的泄漏频率,如表 6.2 所示。

表 6.2　2000 年至 2004 年期间英国和挪威地区泄漏率比较

大陆架	2000 年至 2004 年泄漏数	2000 年至 2004 年设施年数	每 100 设施年泄漏数
挪威,59°N 以北	24	172	14.0
英国,59°N 以北	7	185	3.8

风险等级项目还分析了在发生泄漏时有关海上设施运行条件下的泄漏,以及造成泄漏故障的类型。基于 2001 年至 2005 年期间的泄漏情况,图 6.23 显示了泄漏发生时涉及系统的运作状态。结果表明,在正常作业期间的泄漏约占总泄漏不到 30%。泄漏主要是在手动操作以及启动、停机和差错(也主要是受人工干预的影响)期间受围护损失屏障的影响。

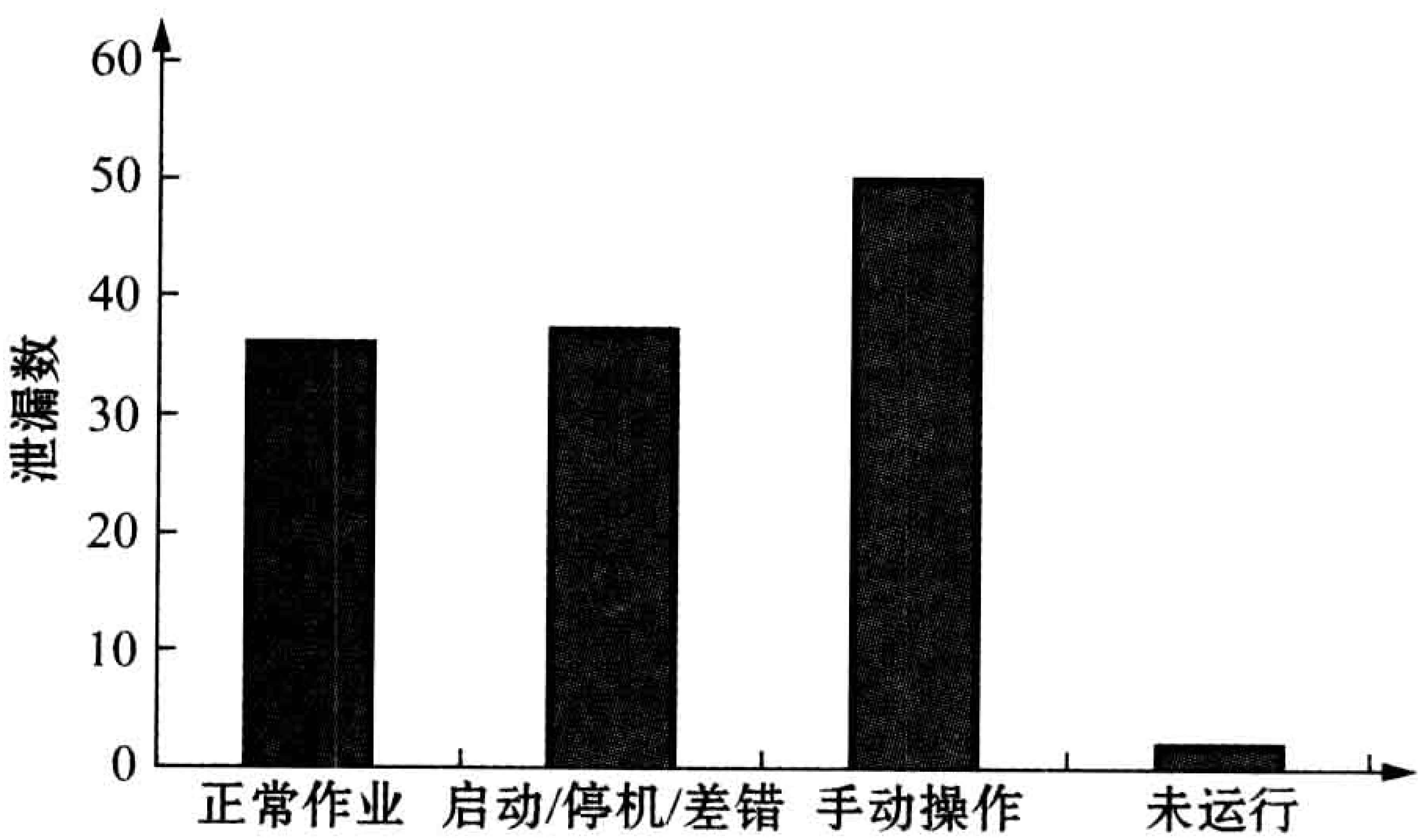


图 6.23　营运阶段记录的泄漏发生情况

图 6.23 表明在可比条件下,挪威地区设施年频率几乎高于英国地区的 4 倍。

接下来的两个图表着重于说明碳氢化合物泄漏的原因。图 6.24 显示了自 2001 年至 2005 年期间挪威地区泄漏的原因,并以平均百分率分布表示。

该图清楚地表明涉及设备(即无作业和人工干预)的占 29%,这几乎与图 6.23 中的“正常作业”相同。将包括操作故障等合并起来,其泄漏高达 70%。相应的约有 32%的泄漏涉及某些程序错误或缺陷。

图 6.25 最后呈现了对由于操作过错导致泄漏事件的更详细分析。其中两个主导原因是为“营运故障”和“忘记关闭”。“营运故障”在此可能涉及类如以错误序列打开阀门,或未按程序或良好惯例执行手动任务。“忘记关闭”可能通

常意味着在打开其他阀门之前或开始泵送前，忘记关闭打开着的阀门。

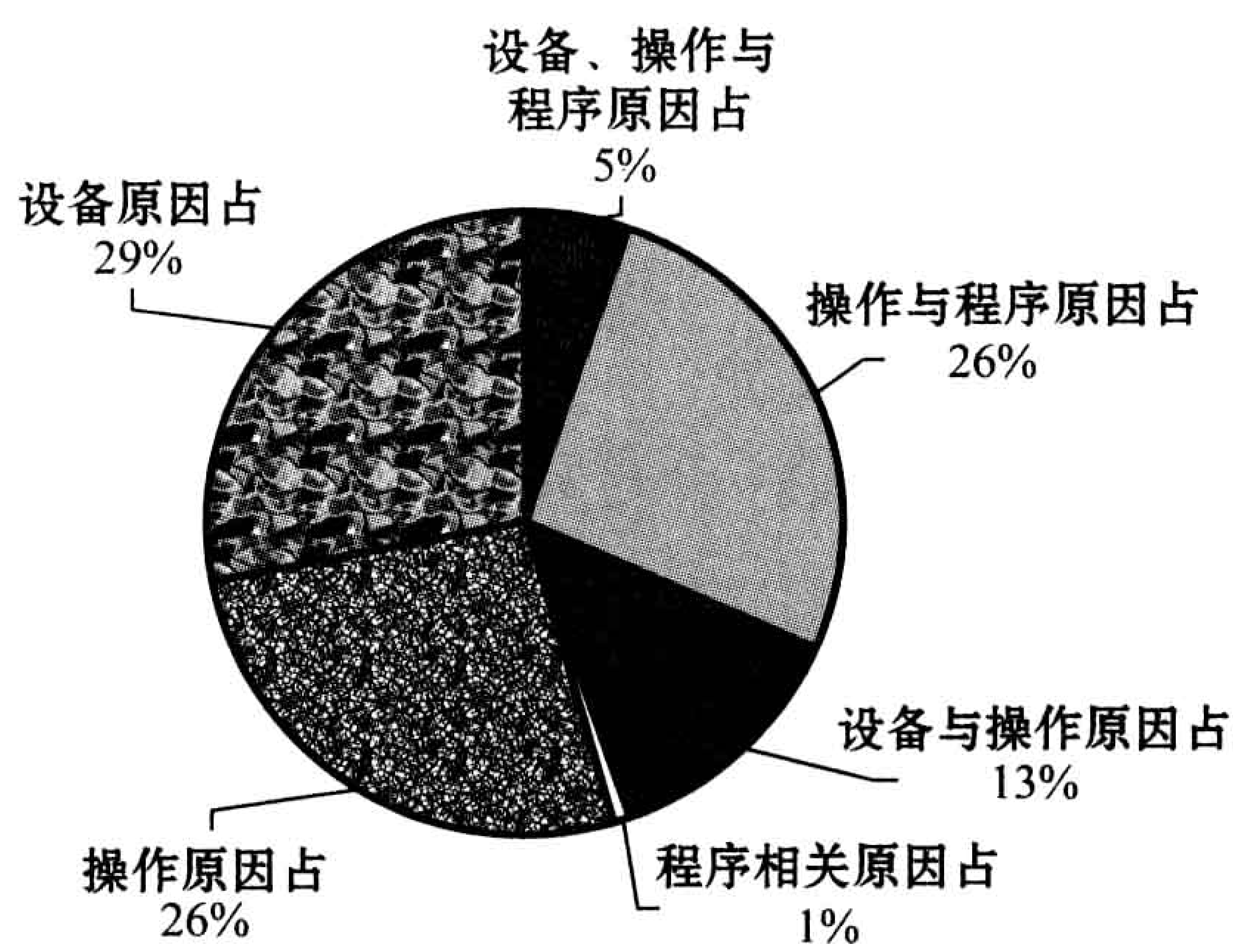


图 6.24 2001 年至 2005 年间碳氢化合物泄漏原因

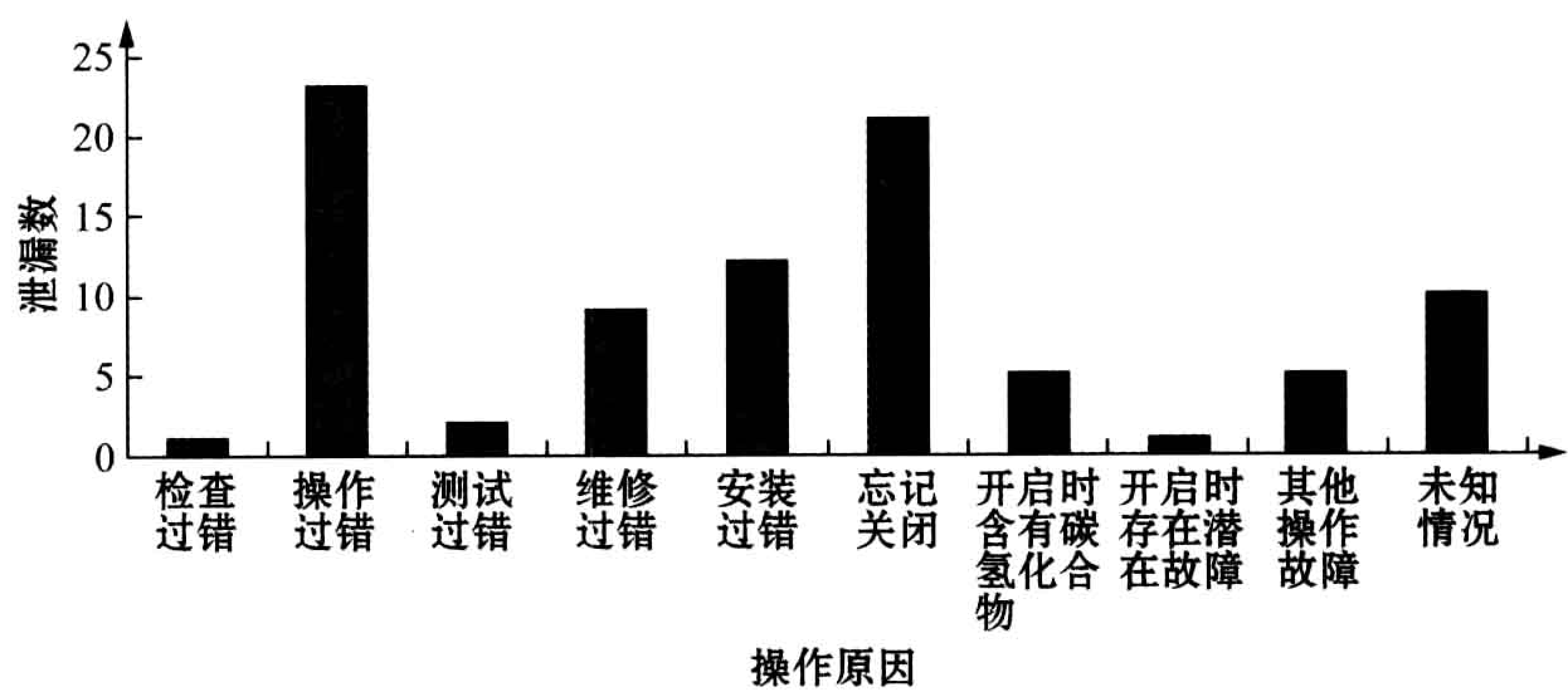


图 6.25 操作故障泄漏原因

6.6.2 从经验数据中计算泄漏率 Calculation of Leak Rates from Experience Data

用于描述碳氢化合物泄漏（特别是天然气泄漏）的主要参数之一是质量流率（通常称之为“泄漏率”），一般以 kg/s 表示。因此，能够计算在海上设施上观测到的碳氢化合物泄漏的泄漏率是很重要的。

相对于从同样质量流率的气体释放，从加压系统液相释放通常会出现小型

气体云雾。这意味着起火概率会降低，而且气体爆炸的可能性也降低。但在某些情况下也有可能意味着液体释放会同气体泄漏一样危险，在某些案例中甚至更糟：

- 一些液体会蒸发，并导致气体泄漏，其通常以大量气体组分为主，具有较低易燃极限，较低燃点或能量；
- 该释放可能构成小液滴喷雾，并可能或多或少地表现为一种气体云雾。

作为时间函数的质量流率会发生明显变化，而所报道的典型泄漏率通常都是最大泄漏率。这是由于事实上气体云雾的规模通常为气体泄漏危险特性的最重要参数，而最大云雾通常是源自于最高泄漏率。

情况并非完全如此，例外情况可能是泄漏持续时间很短的瞬时泄漏。那么，最大气体云雾可能相对于释放时间而言要延迟一些形成。在此类情况下，需考虑“等效”连续气体泄漏，因其将形成具有相同大小的气体云雾。以典型泄漏率所表示的是等效连续泄漏的流速，这意味着潜在危险应该相同。

可用于计算质量流率的测量通常涉及气体云雾规模，一般只考虑超过易燃性下限部分。气体探测器记录可用于计算气体云雾规模，如果该探测器指示数容许，可作为时间函数。

下文依据基于 PSA(2005b)，将依托计算流体力学工具的简单建模来简要说明不同泄漏规模是如何形成不同大小的气体云雾。更详细的案例可能需通过使用计算流体力学工具的研究方式来计算。

在不受约束和通畅无阻的情况下，0.1kg/s 泄漏率的喷流所形成超过易燃性下限的气体云雾具有 0.5m^3的标准量。如果喷流无脉冲(漫射泄漏)，体积会增大至 10m^3。喷流稳定状态的时间为 2s，而对于漫射泄漏的时间为 20s。由于泄漏率低，对于在空旷地方的泄漏或自然通风有限的生产模块内的泄漏，两者之间很少或没有差异。然而，对于较大泄漏率，该区别就变成了重要参数。

大量的露天泄漏(约 10kg/s)将导致气体云雾，并在不到 5s 时间内就呈稳态，而在生产模块内该时间将为 60s。在后者情况下，该气体云雾量(易燃极限内)也非常大，竟高达 20 倍。

可以分析下面例子：在生产模块内的大量泄漏，起始时为 10kg/s，但在 60s 后就下降至 1kg/s。最大气体云雾在 30s 后形成，有 700m^3的量都在易燃极限内。其相当于 4kg/s 的稳定泄漏量，并将形成如等效稳定泄漏场景产生的同样

大小稳态气体云雾。

6.6.3　泄漏的建模 Modelling of Leaks

有几个因素能影响流量建模以及泄漏持续时间：

- 将生产系统区域隔离成有限容量；
- 将生产系统内一个或多个区域减压，以限制天然气或石油泄漏量。

减压模型是最难以解决的问题。在这方面使用的建模既有简单型，也有复杂型。从管线和立管释放多种形态物质确实需要类如 OLGA 一样的复杂计算工具（见附录）。

实际泄漏建模及其持续时间显然非常重要，以确定可能发生火灾的规模和持续时间以及平台响应。对于粗略评价，可使用较简单的模型。

6.7　起火概率建模 Ignition Probability Modelling

起火概率是风险量化最关键的因素之一，其中风险后果通常是直接依赖于起火概率。而有关起火概率方面只有有限的意外事故统计数据，很有可能是因为涉及起火引发的意外事故发生后很难确定此类统计数据。值得注意的是，对于风险量化（即泄漏频率）的其他关键因素，其可用数据的范围要相对大些，虽然该数据并不是十分正确。

此外，由于通过实验室试验很难或不可能建立实际数值，因此很少有可利用的实验数据。可利用的数据类型仅限于闪点和自动起火温度等。

在有些教科书和论文中讨论了一些起火概率模型。这些模型反映了泄漏率和模块容量，但很少有涉及设计和作业细节的方法。由英国健康与安全管理局（HSE）收集的泄漏和起火数据是现有涉及范围最广的在线数据采集方案。

6.7.1 经验数据 Experience Data

自 1992 年 11 月 19 日起，超过 0.1kg/s 泄漏率的碳氢化合物泄漏已未出现起火现象。在该事件中可能正好约有超过 0.1kg/s 泄漏率的少量气体泄漏，很可能在改造工程时被磨削火花点燃。此前，在正常运行的输出泵密封失效，石油从输出泵泄漏，该泄漏点也为起火源。在不到 2min 时间内约有 0.5m^3 的原油泄漏，这意味着泄漏率相当大，约为 5kg/s。

英国健康与安全管理局(HSE)出版了有关泄漏和起火的资料(HSE, 2002)，其中概述了大量泄漏起火的内容。然而，应当指出的是绝大多数泄漏为发生在不同类型实用系统上的非生产泄漏。

下面概述是基于英国健康与安全管理局(HSE)统计数据审核所涉及自 1992 年至 2003 年期间碳氢化合物泄漏起火，如表 6.3 所概述。从概述中可见，在总共 8 起泄漏起火事件中，有 4 起是由于焊接引发，一起是由于搞错加热带，一起是由于泵的排气装置发生爆炸，一起是由于受到雷击，一起不是真正的起火。

英国与挪威的泄漏率比较已在上文第 6.6.1 中作了介绍，其中说明了每一设施年的泄漏频率在英国地区要比挪威地区低很多。而当再比较泄漏起火时，情况正好相反。在 1992 年 10 月 1 日至 2005 年 3 月 31 日期间，英国地区气体和两种形态泄漏与挪威地区泄漏未起火的比较如下：

- 480 起气体/两种形态泄漏大于 0.1kg/s；
  - 其中 187 起泄漏大于 1kg/s；
- 6 起气体/两种形态泄漏大于 0.1kg/s 的已起火；
  - 其中 1 起泄漏起火大于 1kg/s。

表 6.3 泄漏起火一览(从 1992 年至 2003 年期间英国健康与安全管理局统计)

序号	事件说明	起火原因
1	施工建造期间作业时气体泄漏，使用割炬来拆除阀门。即使用氮气惰性冲洗，天然气气窝仍然存在。	割炬点燃未被氮气惰性化的天然气气窝。
2	作业之前未检查短接管内的碳氢化合物。尝试焊接时存在的碳氢化合物造成闪光火苗。闪光火苗在管内消失，并自我熄灭。	焊接点燃了天然气。作业之前未对该设备检查有无碳氢化合物的存在。

（续表）

序号	事 件 说 明	起火原因
3	小火源自仪器脉冲管线，由于搞错加热带。天然气泄漏起火，平台火灾和天然气系统检测到小型火灾，设备关闭和减压，洪流自动激活，并扑灭火灾。	由于搞错加热带，天然气泄漏起火。
4	常年关闭。该设备已减压，但未完全脱气。天然气通过标着关闭（但实际是打开着）的阀门释放出来。	焊接点燃了天然气。
5	在正常作业过程中，克分子水泵涡轮机正在进行燃料转换。涡轮机跳闸，稍后听到爆炸。爆炸源不能立即搞清楚。没有采取燃料——气体泄漏控制行动，最终爆炸源追踪至泵的排气装置。平台顶层甲板上已发现两块碎片。无需应急集合，因涡轮机已被隔离，意外事件得到了遏制。	在泵的排气装置内发生爆炸。
6	当在新接头管道实施焊接作业时，火花点燃了从 XCV-46007 阀门法兰泄漏出来的小股天然气，导致产生 3 至 4”长的火焰。该火焰很快被消防值班人员扑灭，并没有发生损害或伤害事件。平台已被关闭，做泄漏测试以确定泄漏源，随后减压，以替换垫圈。	焊接。
7	天然气排放出口，闪电点燃了低压排风口。固定二氧化碳消防装置扑灭了大火。	闪电。
8	G4500(GT4)埃文郡燃气涡轮发电机启动程序意外事件被认为是由于在启动程序时燃气涡轮机内部有过多的可燃气体。	排气激活烟雾探测器。

6.7.2 Cox 模型 Cox Model

Cox et al.（1991）介绍了简化模型，以及用于确定起火概率的较为复杂模型框架。该模型是基于涉及最低泄漏起火概率的相对简单假设，以及对于观察到的作为极端事件井喷的起火概率。

6.7.3 特定平台建模 Platform Specific Modelling

使用 Cox 模型会产生相对高的起火概率。更根本的问题是在模型中反映不采取任何行动能避免起火。因此，使用特定平台建模很重要，最好还要运行特殊模型。然而，Cox 模型在很长时间内是唯一公开可用的模型，因而得到大量应用（见图 6.26）。特定平台建模旨在反映以下几个方面：

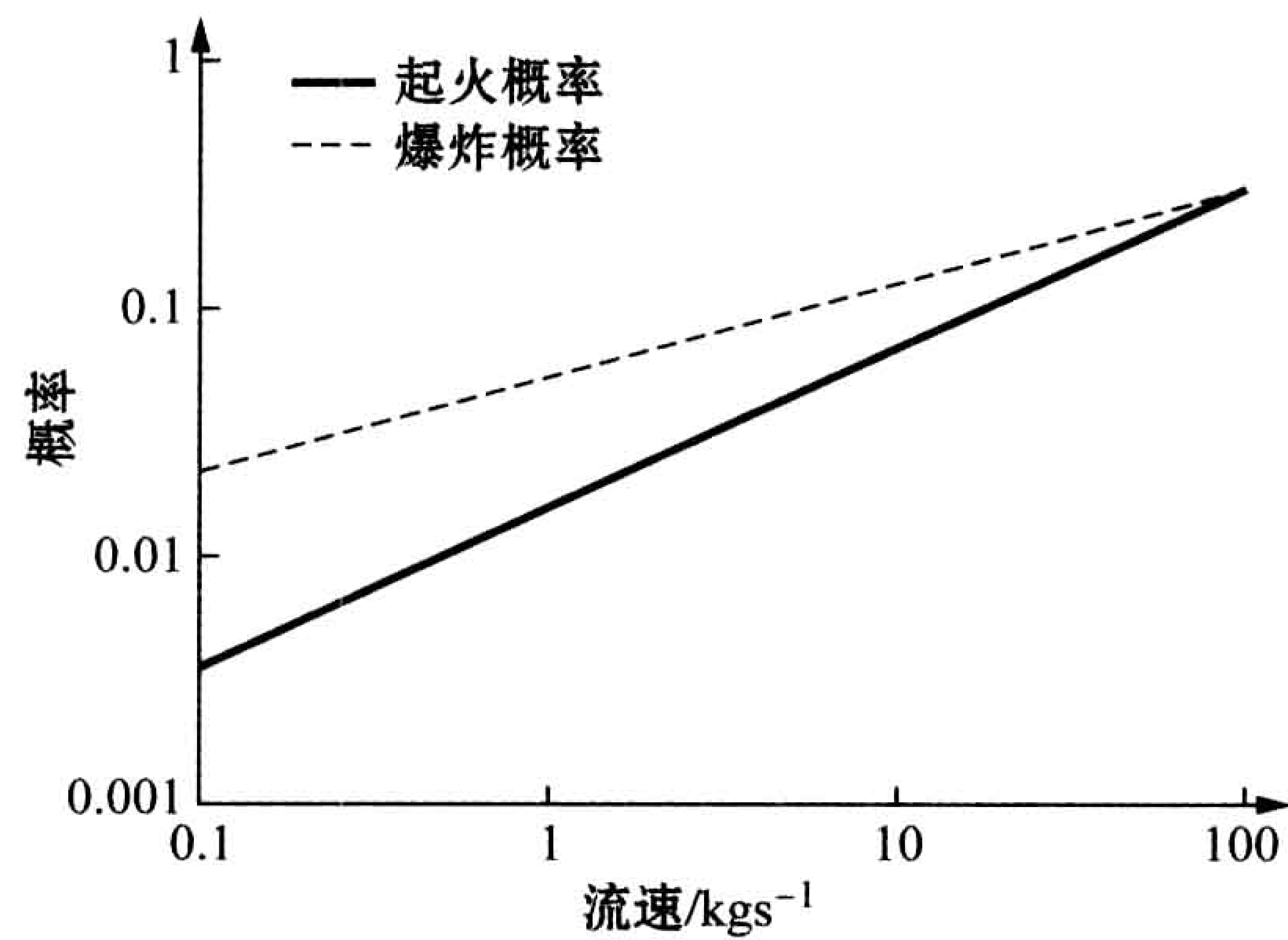


图 6.26 基于 Cox et al. 的简化起火模型

- 碳氢化合物泄漏起火概率依赖于泄漏媒介起火的可能性和敏感性。
- 易燃云雾的规模和浓度，即涉及模块容量和通风量的泄漏率。
- 不同类型设备有不同失效模式和频率，并可能容易受到故障影响而导致起火。因此，就泄漏而言，应根据不同设备部件的起火可能性来区别各类设备类型和设备位置。
- 应明确考虑人工操作起火（如焊接）。同样也应明确考虑永久火源，如火炬和火炉等。
- 起火概率应表示为时变函数。

由于不可能明确考虑各种各样的作业和设备，在所有区域的设备和运行都可认为具有一个“基线”（或“背景”）起火概率。

除了对于起火的这些主要技术要求之外，还需要使用不是太复杂的模型。因此，实际建模总是一种折中办法。

6.7.4 行业最新的时变建模 Industry State-of-the-art Time Dependent Modelling

已有联合工业项目（JIP，DNV，1998b）得到实施，以开发预测离岸量化风险评估起火概率的方法。主要着重于模块内部高压气体释放的起火，以及外部气体离散和起火。

内部和外部的起火模型都有开发。然而，在公共领域内只有一种模型的普通说明，因而在此只能简要介绍。

6.7.4.1 内部起火模型 Internal Ignition Model

已选定了一种既能反映离岸模块的几何条件，又能反映发生释放后危险情况动态发展的方法。因此，有可能包含与潜在起火源以及可能被激活用于控制释放（检测、紧急关闭、排放等）的安全措施和防止起火相关的释放源位置的影响。已制定了 3 个主要模块：

1）预测天然气离散和潜在起火源暴露于可燃浓度的可能性。

2）表示反映经验数据和作业模式的不同火源。

3）整合至时变起火概率函数。

该模型原先涉及简化的离散建模，其中分别计算了在 4 个象限中平均浓度的两个高度。因认为其太粗糙，该方法很快就由更详细的方法所替代。近年来，所有研究都是基于使用计算流体力学电脑代码来计算离散情况。

该模型是基于轻烃气体的释放，但即使如此，使用只在垂直方向的两区块可能会得出保守结果。图 6.27 所示为如何得出该结果的例子，并呈现了连续与不连续火源以及总概率。

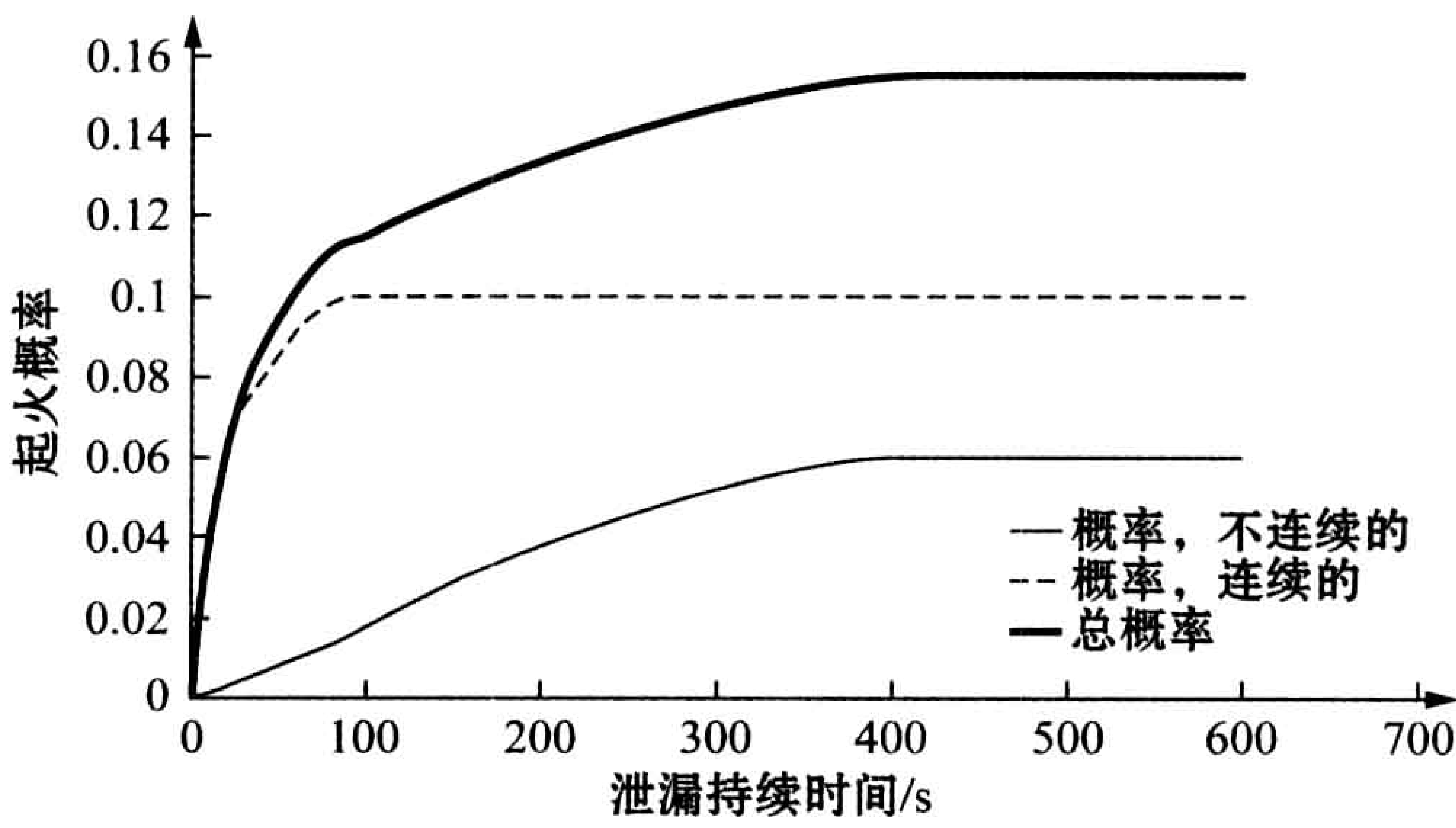


图 6.27 包括连续和不连续火源的时变起火概率图示

图 6.27 意味着总起火概率由“连续”和“不连续”火源两部分组成。由于连续火源，起火概率通常约在 90s 时间后就已达到稳定水平，此后该机制不再进一步起作用。不连续火源通常约在 6～8min(图中为 400s)内对起火概率起作用，此后不可能再起火。

对于冷凝物泄漏，该建模不具代表性，并有可能产生非保守结果。

6.7.4.2 外部起火模型 External Ignition Model

已开发出用于预测离岸平台周围气流复杂现象的数学模型。在该方案的极限范围内，可使用通用模型以始终如一的方式计算气体离散以及由此产生的起火概率。该数学模型是基于相关的计算流体力学有限数量的案例，以及从这些案例中演绎的物理效应。因此，该模型具有相当严格的局限性。

6.7.4.3 关键环节 Critical Aspects

人们已发现该模型产生相对高的起火概率。虽然应该指出的是，该起火概率与英国健康与安全管理局(HSE)泄漏和起火数据库中的数据相比并不高，与上文描述的 Cox 模型相比也不算高。然而，与在该领域内工作的某些咨询公司一直使用的起火概率相比，此起火概率稍微偏高。

因此，自 2004 年起开始对该模型进行修改。此项工作意图是根据最新可用数据对模型进行校准，并允许从设计或运作方面影响各种概率。第 6.7.5 节简要介绍了新模型。

另一关键方面是外部起火模型，该模型相当粗糙地表示平台外部的流量。外部火源有时是连续的，并且不可能迅速隔离(火焰等)。因此，这方面的建模应尽可能逼真显得很重要。

6.7.4.4 起火模型的校准 Calibration of Ignition Model

在 1998 年实施了基准实验(DNV，1998c)，通过比较基于近年来北海火灾实际数字计算获得的预测数来校准起火模型。遗憾的是发现数据不足以阻碍从该实验中获取任何肯定的结论。

然而，下文是对起火建模含义的简要说明，仅限于爆炸概率。

自1992年以来,英国健康与安全管理局(HSE)已实施了报告碳氢化合物泄漏的刚性制度,并每年公布统计数据。该综述报告确定的泄漏数目可能相当精确,但仅限于英国大陆架的海上设施。

该项研究将最小泄漏排除在外,因这些泄漏被认为是不会形成能引起爆炸的大型气体云雾。因此,在此期间内的泄漏数为735次[非微量]泄漏。相应信息不可应用于挪威地区,因而只能在英国地区实施对泄漏频率的正常化。

第7.3.4.1节将进一步描述通过对爆炸研究确定的爆炸数量(Vinnem,1998)。对于英国地区,在此期间内发生了4起爆炸事件,且都是些微不足道的有限爆炸冲击载荷。只有其中2起是与量化风险评估研究所涉及生产系统相关。对于挪威地区的类似数值,5起中有2起,其中一起导致的爆炸冲击波荷载略高于0.2bar。

最难之处是基于使用起火模型来确定对挪威或英国海上设施爆炸概率的预测,理想情况是该模型应当适用于所有英国(和挪威)的海上设施。这是几乎不可能实施的非常耗时的工作。然而,至今为止已完成了下列任务:

- 利用时变起火模型及气体泄漏频率,已详细计算出个体海上设施特定生产泄漏的平均爆炸概率。
- 应用上文描述的爆炸研究(Vinnem,1998),已计算出在北海每一海上设施的爆炸区域数目(无论是所有设备都安装在一个区域内的小型平台上,还是用防火墙/防爆墙与其他生产区域相隔的一个区域)。该信息用于生成频率预测整个英国北海地区的生产泄漏和爆炸概率。
- 假设平均爆炸概率适用于所有爆炸区域,不论是何种平台类型,只要爆炸区域数量超过每平台一个区域的。
- 对于只有一个爆炸区域的平台,感觉是非常简单的。需要应用调整系数的方法,对于英国平台该调整系数为0.5,挪威平台则为0.8,其差异是由于在挪威地区的简单平台要少于在英国地区。这些都是比较粗糙的假设,需实施敏感性分析,以弥补该不足。

两种方法的结果都在下文描述。

6.7.4.5 实际爆炸数量的校准 Calibration of Actual Number of Explosions

首先,实际爆炸数量是由起火模型和通用泄漏频率所预测,并与英国和挪

威的实际爆炸数量相比较。该爆炸数量很重要。如上所述，有些与爆炸相关的系统和机制并未在量化风险评估中涉及，因此必须在校准时予以排除。这涉及以下内容：

- 在英国的 4 个案例中有 2 起事故是由于照明系统内部爆炸所致。
- 在挪威地区的 5 起案例中有 3 起事故是由于超出量化风险评估研究范围之外的问题，其中一起是由于在消防水泵房内施工，另一起是由于在井口区域手工作业，还有一起是由于内燃机爆炸。

各种结果的比较列于表 6.4 中。

表 6.4　北海地区预测爆炸数与真实爆炸数的比较

爆炸国家	预测爆炸数	相关已发生爆炸数	全部爆炸数
英国	8.2	2	4
挪威	3.6	2	5
总计	11.7	4	9

预测爆炸数与相关爆炸数之间的比例为：11.7:4 ≈ 2.9。

该方法的薄弱环节实际上是校准包含了泄漏数量以及起火概率两者，假定气体[或冷凝物]泄漏就会导致爆炸。下面的比较试图消除气体泄漏频率。

6.7.4.6　爆炸起火条件概率的校准 Calibration of the Conditional Explosion Ignition Probability

假定气体泄漏发生，就需为爆炸起火条件概率执行二次校准。

该预测值取自于上文提到的量化风险评估研究，其中起火概率是根据时变联合工业项目模型计算而得，泄漏频率则是根据健康与安全管理局(HSE)数据库计算而得。实际爆炸数目涉及上文所述的英国地区泄漏数量。对不相关爆炸案件消除的实施如上所述。该结果列于表 6.5 中。

基于预测爆炸数与相关爆炸数的条件起火概率之间的比例为：1.52 ∶ 0.272≈5.6。

相对于实际校准起火模型，认为该方法较好，因为泄漏数量是从校准中排除的。最相关的比较意味着联合工业项目模型过度预测起火概率具有 5.6 系数。

表 6.5　英国地区预测概率与实际比率的比较

	起火引起爆炸的概率		
	联合工业项目模型的预测	相关爆炸	所有爆炸
平均值	1.52×10^{-2}	2.72×10^{-3}	5.44×10^{-3}
预测极限			
上限(90%)		1.45×10^{-2}	
下限(10%)		3.00×10^{-3}	

然而，还应指出所包含的案例数很少，只有两起相关爆炸。尽管如此，仍可看出 80%的置信区间完全低于预测值。事实上，频率超出联合工业项目模型预测值的概率约为 8.5%。可是，联合工业项目时变起火模型过度预测爆炸起火概率的系数似乎通常在 2～3 范围内，或甚至更高。

6.7.5　修正联合工业项目模型 Revised JIP Model

Scandpower Risk Management(2006)描述了修正模型。该模型具有以下特点：

- 模型参数反映了涉及挪威和英国大陆架上海上设施气体泄漏和起火的 10 年(1992～2002)期间的经验；
- 模型对即时起火有很大作用(取决于泄漏率)；
- 模型包括作为气体云雾增长函数的起火(对于连续火源)；
- 模型考虑作为可燃性气体云雾(离散火源)规模函数的起火；
- 模型反映取决于气体检测的火源隔离。

输入至模型的是对气体云雾的描述，即在给定时间步长内可燃混合气的规模/体积，以及在该时间步长内气体云雾逐步增加的说明。气体检测和后续火源隔离时间都必须输入至模型。该模型具有以下参数：

- 事件起火，P_{event}；
- 区域内火源，P_{if}；

- 连续与离散火源，i_a，i_b；
- 火源隔离的影响，P_{iso}；
- 时间延迟，因热表面起火和隔离，P_{hot}。

术语“事件起火”是表示即时发生的起火，通常涉及以某种方式泄漏的原因。这可以是设备故障、受撞击或操作人员干预，例如，明火作业等。

在实际区域分布的潜在火源是由参数 P_{if}来表示的。该 P_{if}参数的定义为由连续和离散火源两者组成。

对于离散火源的起火概率的相对作用以 i_a和 i_b来表示。参数 i_b用于隔离前，参数 i_a用于隔离后。由于离散火源起了更大作用，因而延迟起火概率增大，发生爆炸危险就将增大。火源隔离的影响将也会增大。最后，由于难以自动检测到小型气体云雾，少量泄漏的起火概率将会更高。

火源隔离影响起火概率是使用参数 P_{iso}来量化的。$P_{iso}=0$ 表示火源隔离对于起火概率而言并无影响。$P_{iso}=1$ 表示火源隔离有效地阻止了在该区域内的所有火源。有了高效的火源隔离，延迟起火概率就会降低，但只适用于那些高效检测过的场景。爆炸风险也将减少，因为巨大气体云雾起火可能性较小。

对于连续火源，有个涉及热表面冷却时间的附加延迟。连续火源仍是潜在火源的概率已通过建模而成倍减小。分数 P_{hot}是仍然可以点燃易燃气体云雾的隔离火源分数。

6.8 事态加剧建模 Escalation Modelling

屏障是指那些能预防事态加剧的系统和对策。通过比较两个真实事件的结果就能很好地说明屏障的重要性，这两个事件都涉及平台受压区域的中等气体泄漏。最坏的情况就是众所周知的于 1988 年 7 月 6 日发生的帕玻尔·阿尔法油井事故灾难，而在 1988 年 7 月 5 日发生在布伦特·阿尔法平台上的爆炸事件知者甚少。该事故起始时与帕玻尔·阿尔法油井事故完全相同。事件结果是爆炸后天然气起火，由于自动系统的作用，在约 45min 时间内就控制住火

势，只有压缩模块表面受到损坏。两起事件之间的巨大差异是由于在布伦特·阿尔法平台上屏障按预期设计运作，而在帕玻尔·阿尔法油井事故中屏障并没有运作。在第 8.1.1 节有关于这两起意外事故的一些更详细的资料。

本节讨论在事件树中的屏障建模，涉及其功能性、可靠性和可操作性以及系统残存性，有时称之为意外载荷的易损性。

6.8.1　功能性 Functionality

屏障的功能性分析包括确定屏障是否能执行其预定功能。例如，催化剂型气体探测器常常遭受到盐和其他污染物的“损害”。消防供水系统可能会遭污垢、铁锈和其他颗粒物堵塞，以致不能提供所需容量消防水的程度。

功能性分析是对在正常作业条件下系统容量和/或性能的确定性分析，包括分析其营运场所和约束条件。功能分析的结果可能会决定屏障功能的概率建模。

功能性的许多方面可以通过测试来进行验证，例如，实施消防水系统流量测试，可以包括测量流速。但同时，区分在理想测试条件下与在现实生活意外条件下的功能性尤其重要，因误操作可能会危及功能性。

6.8.2　可操作性和可靠性 Availability and Reliability

事件树中的许多节点都涉及安全系统的性能，通常认为安全系统是被动的，或是“休眠”系统，只在检测到危险事件或事故时才被激活。因此，即使此类系统能修理，并一直处在维护当中，其功能在事故序列中是作为不可修理的系统，就所需条件而言，通常没有时间维修。

这就意味着可操作性和可靠性两者都是至关重要的方面。首先，我们分析系统可操作性只有在检测到特定条件后才需要操作。通常称之为“按需可操作性”。维修、检查和/或测试状态将决定其预期功能的可操作性。其次，系统可靠性，即在系统被激活后，首次故障时间对某些系统也至关重要。

系统之间存在相当大的变化，对于这两方面哪个是最重要的，或他们是否同样重要，可以通过分析气体检测系统来说明。尽可能早地检测到可能的泄漏

显得至关重要。因此,在泄漏起始时系统可操作性是关键环节。当检测实施过后,确实不会进一步再使用检测系统。该系统的可靠性并不重要。然而,消防水系统却完全是另一回事。当系统被激活后,立即启动是至关重要的,但同样重要的是只要火势犹存,消防水系统就必须继续运作。因此,无论是可操作性还是可靠性都是重要方面。

当计算可操作性和可靠性时,包括检查和测试在内的所有预防性和根治性维护方面都必须加以考虑。故障树分析是常用的分析技术。

涉及碳氢化合物系统控制的许多屏障(安全系统)都是自动的,现场控制室人员不能实施逆向操作。但是反之,某些系统需要控制室人员启动,最典型的是放空系统,在启动后将按顺序或同时减压生产设备。在启动过程中操作人员的参与意味着在可用性和可靠性研究中需明确地解决人和组织因素的问题。

事实上,人和组织因素的重要性有时甚至对于涉及非烃系统的屏障更加至关重要。例如,人因过错是针对浮式生产储卸装置(FPSO)的海洋危险屏障失效的主要原因(Vinnem and Hauge,1999)。因此,实施屏障可用性和可靠性分析时应适当注意人和组织因素的重要性。

多数安全系统均执行定期测试,这意味着如果系统收集和分析就会有大量经验数据。这可用来制作海上设施的具体可用性数据。在事故发生过程中系统继续运行的可靠性数据通常不能从测试数据中提取。

6.8.3 残存性 Survivability

残存性分析可认为是可靠性分析中的一种形式,除了运行条件是事故条件之外。严重的爆炸事故很可能会损坏消防供水系统,甚至消防水不能供给某一区域,即使其原有功能状况及维修状况都是完美无缺,并毫无故障。然而,值得考虑 1996/1997 年所谓的"大型"爆炸试验的经验(SCI,1998),从中可见消防用水管道残存性远远高于早先认为的过压负载。第 9.3 节将给予简要讨论。涉及生产管系和设备以及放空管系和照明系统完整的残存性也很重要。

如果实施故障树分析,残存性分析可能会整合至可靠性分析中。由于所涉及现象的性质,在现实意外条件下测试残存性是几乎不可能的。

6.8.4　节点概率 Node Probability

节点条件概率的终值是上述所有要素的函数，并可用于气体检测作为例子表示如下：

$$Pf_{GASDET} = Pf_{FUNCT} + Pf_{UNAVAIL} + Pf_{SURV} \tag{6.6}$$

式中：

Pf_{GASDET}——气体检测失效概率；

Pf_{FUNCT}——在特定意外情况下，气体检测概率不能如预期那样起作用；

$Pf_{UNAVAIL}$——由于维护保养问题，气体检测概率不能利用；

Pf_{SURV}——在规定时期内发生意外情况，气体检测概率不能残存。

6.9　事态加剧分析 Escalation Analysis

通过分析保护系统性能以及设备和结构响应所确定的从起始意外事件至最后终点事件的总过程，有时也称之为“事态加剧过程”。这是“事态加剧”的广义解释。因而，根据该解释的事态加剧涉及确定不同事故序列以及相关载荷和适用于每个序列的响应。

“事态加剧”的狭义解释是描述其由于意外事故影响而作为二次失效的遏制。这是本书中所使用的“事态加剧”解释，并且由“事故序列”建模或分析术语来替代广义解释。

如果需要考虑资产风险，实施事态加剧分析可能是至关重要的。可独立进行事态加剧分析的替代方案是涉及评估主要安全功能受损频率的所谓损害分析。事态加剧分析和损害分析两者都注重于对意外载荷的响应，并主要注重于对火灾和爆炸载荷的响应。

6.9.1 火灾事态加剧建模 Modelling of Fire Escalation

从一个区域至另一个区域的火灾事态加剧需要预测火灾是否蔓延出原区域范围之外。从原火灾引起的二次火灾影响，包括烟雾或辐射，并不视为事态加剧。据推测，火灾可能造成事态加剧是由于防火墙损坏、燃料直接流向邻近区域或外部火焰。事态加剧至其他区域可能是由于下列 3 种不同事态加剧机制：

- 外部火焰的热量影响；
- 火焰穿透地板、墙壁或屋顶的开口；
- 隔离墙失效。

外部火焰的“临界持续时间”是指短期闪燃火焰与稳定火焰之间的过渡点。如果火灾持续时间超过该临界持续时间，事态加剧概率会从近似于零值增大至具体局部条件所决定的数值。

在此类情况下，(着重于防止事态加剧至其他设备的)保护系统的效果是有限的。生产区内隔离墙、天花板和地面失效与载荷和被动消防相关。由于火灾导致结构失效的可能性可以从下列两种方式进行考虑：

- 基于简单传热值的粗糙建模；
- 基于全面非线性结构分析的详细建模。

生产区内火灾事态加剧建模是一项复杂任务，可以是一个“永无止境的故事”，除非以某种方式加以限制。必须使用某些简化措施。下面例子取自于详细的量化风险评估((Vinnem et al. 1996a)，说明了相当详细的火灾事态加剧模式。在所引用的研究中，火灾事态加剧已按下列步骤进行：

1) 使用一系列包括壁厚、管系直径、内部压力、系统媒介和放空时间等参数，对管系失效时间的非线性结构进行分析。

2) 在生产区内进行调查，以判断某一生产区段火灾会影响其他区段管系的

条件概率。该评估包括需考虑火焰规模和相邻管系大小。

3）按照上述步骤 1 和 2，通过分析每个场景的具体情况，然后计算事态加剧概率。图 6.28(Vinnem et al. 1996a)呈现了在火灾载荷下管道系统非线性应力分析结果的例子。

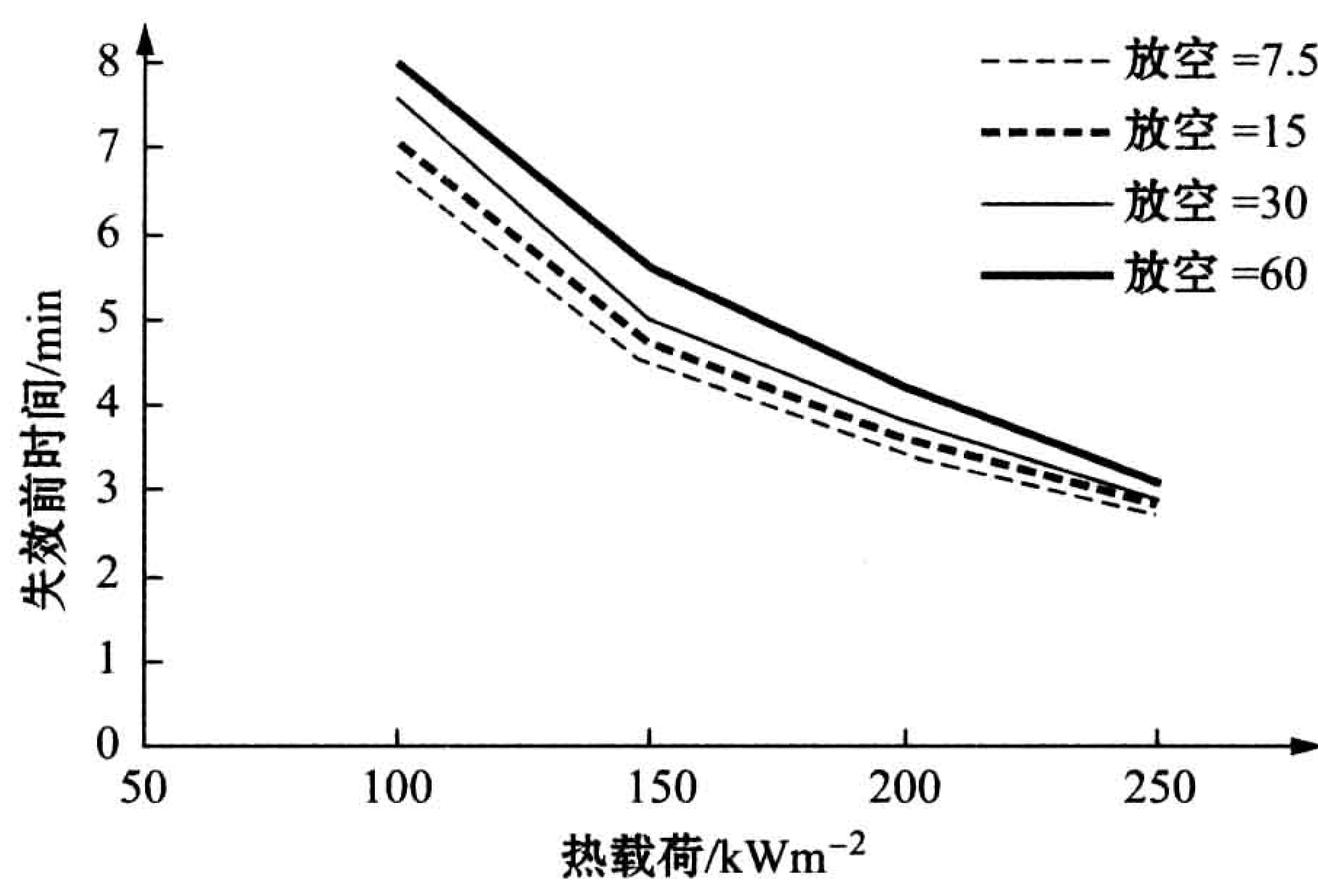


图 6.28　依据热载荷时间和放空(BD)时间的管道失效研究结果

在特定场景下，事态加剧的实际概率将取决于：

- 相对于其他设备位置的火灾规模；
- 火灾类型；
- 火灾持续时间；
- 积极和/或被动消防的效果。

6.9.2　爆炸事态加剧建模 Modelling of Explosion Escalation

主要是由于在 1996/1967 年(SCI，1998)进行的所谓“大规模”测试结果，近年来，作为事态加剧可能起因的爆炸已成为人们关注的焦点。在这些测试中发现的爆炸载荷要比在小规模试验中已发现的爆炸载荷高得多，因而现有设计方法受到了质疑。爆炸可能导致几种不同方式的事态加剧：

- 总体结构崩溃；
- 爆炸屏障的破裂(拆分区域或模块)；
- 爆炸屏障过度变形直至达到不能再起到屏障功能的程度；
- 甲板或墙体过度变形导致其他区域的设备部件围护损失；
- 生产设备过度变形导致其他区域的设备部件围护损失；
- 在爆炸发生后，安全系统受损而不能起作用。

事态加剧建模在以前做得非常简单，就某种意义上认为在 0.3bar 的过压下生产设备和消防水管道就会破裂，在 0.5bar 的过压下构筑物就会崩溃。然而，现已清楚地表明该提法是不适当的，就某种意义上而言过于保守。由于大范围爆炸冲击载荷的概率更高，这将会是非常保守(且耗费巨大)的提法，如果该保守提法应用于事态加剧建模。该提法还有不足之处就是，此模型与平台特定建模恰恰相反。

因此，事态加剧建模要做得更具体，于是就需要专门分析，以确定逼真的爆炸载荷。在第 9.4 节中将进一步讨论如何可以做到这一点，但应指出的是目前的经验表明分析必须基于使用计算流体力学(CFD)。

因此，事态加剧建模应力求能反映平台结构和设备的实际载荷与能力。这可以用下列任一种方式进行：

- 从爆炸分析中转换输出至理想化的动态载荷，然后可用作响应计算的输入值(通常使用三角压力脉冲)；
- 从爆炸计算中离散输出(压力—时间曲线)至线性部分，可用作结构分析软件的输入值。

有必要在考虑到弹性和塑性响应两方面以及巨大变形影响的情况下，实施注重系统动态的响应计算。

6.9.3 损坏的限制 Damage Limitation

有许多可用方法能限制可能造成的损坏，从而限制潜在的事态加剧。重要

的是在分析中尽可能地反应这些方法，这尤其是因为分析能确定所考虑的任何风险降低措施的效果。损坏的限制是基于使用如下主动和被动系统：

- 结构、墙体、甲板、管系和设备的被动消防保护；
- 减少爆炸超压的爆炸释放系统；
- 冷却和/或灭火的主动消防保护系统；
- 减少超压的主动爆炸保护系统。

传统认为被动系统更可取，因为是独立激活。主动系统的关键问题始终是在发生意外情况下未能被激活。还有一种趋势是概率减少措施优于后果降低措施。在这两种因数之间有时可能会有冲突。下文中的重点是如何模拟这些系统。第9.5节将更彻底地讨论减少风险的可能性。

6.9.3.1　被动消防 Passive Fire Protection

有几个软件包能用于分析被动消防的保护功能。同时可应用于结构及设备。由于意外火灾载荷和保护屏蔽，可用精确和确信的合理方式计算实际结构或设备所受到的温度载荷。

此类计算必须要基于某种理想化条件，并且通常并不反映防火材料可能发生的机械失效，或材料老化。尽管存在这些限制，普遍认为预测结果的准确性相当高。

6.9.3.2　主动防火防爆 Active Fire and Explosion Protection

主动防火的影响是难以明确建模的。对该问题的研究似乎相当有限，主动防火的应用主要是基于各种标准、规范和行业公认准则。可以计算出理想化条件下主动防火的冷却效果，但是这种做法很少，而且使用理想化条件的效果可能会对结果适用性产生很大影响。

通常认为损坏限制的主动防火效果相当简单，无需详细计算。这可能导致在分析中会进一步保守。

同样也考虑通过主要使用大水量灭火系统的主动防爆，或抑爆措施。由于大规模测试程序的结果，最近该做法有所改变，现在爆炸模拟计算流体力学代

码能模拟大水量喷洒系统对爆炸超压的效果。

6.9.3.3 爆炸释放
Explosion Relief

通过模块墙体、顶壁和底板的面板和开孔的爆炸释放通常会与实际载荷放在一起计算,因为这两个方面彼此关联。现代计算流体力学代码可以顾及爆炸释放措施。

6.9.3.4 分析考虑
Analytical Consideration

以上各节已证明使用详细和定量方式分析意外载荷的方法是比较有限的。为区分事故后实际发生情况与可能造成的损坏程度,实际情况会发挥重要作用这一事实使得事情变得更为复杂。一旦具有分析能力,其必定会与比较理想化的考虑相关联。

抛射体所造成的损坏是几乎不可能详细建模的另一方面问题。已经尝试了一些基于粗糙建模的经验数据,但不是在逐案基础上的详细建模。

这就是为何很少尝试意外损坏精密分析的主要原因。事实上,该情况在一定程度上得到了改变,因为现在可以使用先进分析工具计算出爆炸损坏。然而,至今为止,此类工具的有效性不及那些应用于火灾载荷的工具。假设要使其发挥作用,大量资源都需要专门经过此类研究。

6.9.4 设备对火灾和爆炸的响应
Response of Equipment to Fire and Explosion

6.9.4.1 火灾响应
Fire Response

螺栓是管道法兰的重要组成部分。配有普通螺栓的法兰,其钢材临界温度约为 450℃,而配有特殊螺栓的法兰,其临界温度为 650℃(Gowan,1978)。

在火灾中,装满易燃液体的船舶会吸收热量。船舶“潮湿”部分吸收的热量加热和蒸发液体。当考虑火灾危险时,通常会考虑在船舶下面的碳氢化合物池火。由于液相蒸发作用将会使船舶内压力增加。如果船舶压力释放系统能容

不足(蒸发率高于释放率),可能会发生"沸腾液体膨胀蒸汽爆炸(BLEVE)"。

在空船舶、充满天然气的船舶以及装满液体的船舶之间有很大差异。在Gowan(1978)中通过参考在管道上具有 122kW/m² 热载荷的具体案例说明了该差异,其中产生了下面的响应时间(钢质墙体温度达到 600℃所需时间):

- 充满气体管道(=14',厚度 20 mm):4min;
- 充满气体管道(=32',厚度 43 mm):7min;
- 装满液体管道(=32',厚度 43 mm):13min。

基于几个池火的测试系列,美国石油学会(API,1976)根据池火几大系列的测试已开发出吸收热量的计算方法。该计算方法可用下列公式表示:

$$q = 2.6 \cdot F \cdot A^{0.18} \tag{6.7}$$

$$Q = 27.9 \cdot F \cdot A^{0.82} \tag{6.8}$$

式中:

q——船舶潮湿部分平均每平方米表面吸收热量(kW/m^2);

F——无量纲因子:$F=1.0$ 非绝缘油罐和船舶;$F<1.0$ 绝缘油罐和船舶;

A——船舶潮湿部分面积(m^2);

Q——船舶潮湿部分总吸收热量(kW)。

该表达式是基于假设池火火焰会影响球形油罐总表面积的 55%,卧式圆筒形油罐的 75%,以及在立式圆柱形油罐侧面高达 9m。

船舶没有罐装液体部分("干燥部分")的钢板温度将升高,而钢板在高温时可能会断裂。

表 6.6 所示为由于钢板的张力作用和钢板厚度而使未隔热钢板破裂所需时间。表中数值的计算是基于吸收热通量为 $44kW/m^2$。钢板一面暴露于外。

表 6.6　未隔热钢板暴露于池火时断裂所需时间(API,1979)

钢板张力/MPa(N/mm²)	钢板厚度/mm	火灾起始至断裂所需时间/min
70	3	5
	13	13

（续表）

钢板张力/MPa(N/mm²)	钢板厚度/mm	火灾起始至断裂所需时间/min
	25	23
140	3	2
	13	8
	25	17

文选中通常引用540℃作为承载构件钢材临界温度，这是基于在此温度下钢材屈服应力大约为正常环境温度的一半(American Iron and Steel Institute, 1979)。作为一项指标，通常540℃可作为生产设备钢材的临界温度。随着吸收辐射通量至30kW/m²，在一段时间后(视厚度而定)，钢材中的平衡温度将达到535℃。达到该平衡点的温度随钢材厚度不同而变化。

图6.29中可见在火灾载荷下钢材性能的另一例图。该图表明屈服强度是逐步降低的。该图还表明极限强度(受制于应力-应变关系)实际上增大至250℃。

采用非线性有限元计算方法可以计算整个系统的结构响应。

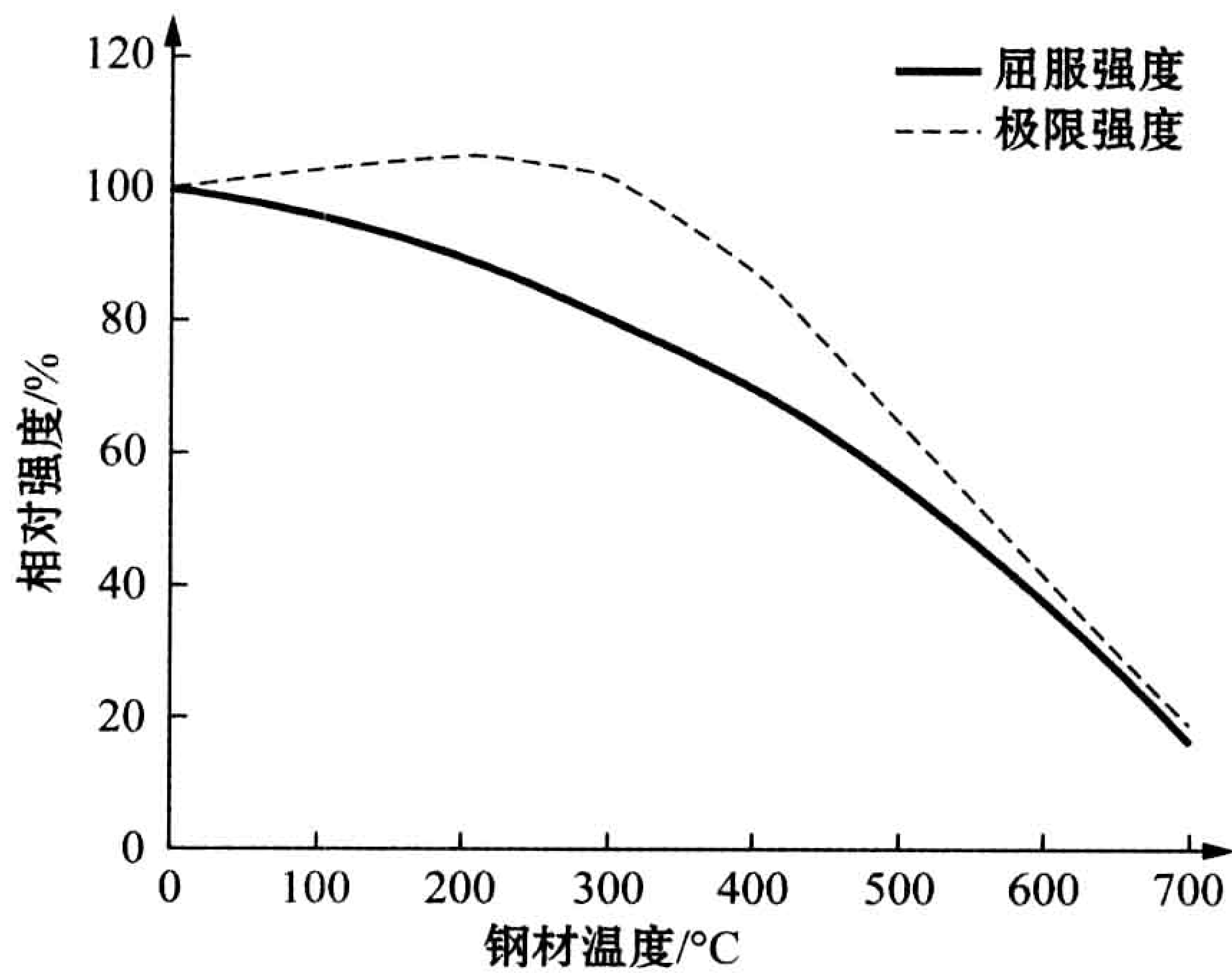


图6.29　温度升高时结构钢的性能

6.9.4.2　爆炸响应
Explosion Response

实际上有大量涉及结构、设备和人员对爆炸超压载荷响应的数据。许多涉

及爆炸对人体影响的数据都来自于军事方面的工作和经验。采用非线性有限元计算方法可以计算整个系统的结构响应。

6.9.5 人员的耐受性准则 Tolerability Criteria for Personnel

6.9.5.1 热辐射 Heat Radiation

API RP 521(API,1997)规定穿戴“适当服饰”人员可允许长达 1min 时间暴露于 6.3kW/m^2 热辐射水平(API,1997)。“紧急行动持续数分钟”暴露于 4.7kW/m^2 热辐射水平证明为暴露极限,而 1.6kW/m^2 则为可连续暴露于热辐射水平的极限。

2003 年 5 月进行了有志愿者作为测试人员参与的测试,以确定基于美国石油学会(API)的极限是否过于保守。通常并没有足够数据能证明该水平过于保守;然而,测试记录表明暴露时间稍微长些是可以接受的,且没有发生严重烧伤。

6.9.5.2 空气中氧含量 Oxygen Content in Air

当氧气浓度从 21%降至 14%(体积)时,呼吸和脉搏频率会增加。保持注意力和思维清晰的能力就会减少,并且肌肉协调能力有些紊乱(Henderson and Haggard, 1943)。

6.9.5.3 一氧化碳(CO) Carbon Monoxide

SAX(1984)引用了已发表的 45min 暴露于 650 ppm 浓度的最低“中毒”极限。一般引用的致死浓度要高一些。

6.9.5.4 空气温度 Air Temperature

假如湿度低的话,可以维持很高气温。例如在桑拿浴室,温度常在约

100℃。在夏季,沙漠气候温度可达到50℃以上,但通常都有较低湿度。

气温超过50℃可作为损害准则。该准则主要适用于临时避难所,因为在逃生和撤离时可能会允许短期内暴露于高温下。

6.9.5.5 烟雾 Smoke

烟雾可能会妨碍逃生和撤离,如果能见度降低到如此程度,以致人们不能够定位自己或不知道逃生通道是否通往安全地点。有时使用“昏暗”因素,以表示能见度受限制。因此,损害准则可表述如下:

- 当烟雾浓度如此之高,以致不能看清逃生通道和走廊尽头,就可认为是安全功能受损。有时称之为最小视距,假定为10m左右。

6.9.6 安全功能的损害准则 Impairment Criteria for Safety Functions

为判断何时安全功能无法充分发挥作用,损害准则是必不可少的。下文讨论了损害分析以及需要考虑的主要问题。

值得注意的是,此类准则大多是“软性的”,即并不与硬件损坏相关,也与结构失效无关,而是取决于意外事故对人员产生的影响。

6.9.6.1 逃生通道的损害 Impairment of Escape Ways

逃生通道被堵概率是与人员抵达临时避难所的所需时间相关。确定逃生通道被“堵”因素可能还是有用的。通常会需要考虑如下3个因素:

- 结构损坏/碎片;
- 高温载荷;
- 燃烧产品。

第一个因素主要是与严重的结构撞击(碰撞)或爆炸影响相关。

在许多场景下，热载荷是评估逃生通道功能的最重要因素。20～25kW/m^2的极限值通常是人类在几秒钟内可容忍的最大热载荷。如果考虑有较长时间暴露的话，应使用较低值(见上文第 6.9.4.2 节)。

燃烧产品而产生的损害可能会导致更大区域的损害。火灾中的燃烧产品主要产生两方面的影响：

- 由于烟尘产生而导致能见度低；
- 主要是涉及 CO 和 CO_2的毒性。

6.9.6.2　临时避难所(TR)
Impairment of Temperature Refuge

健康与安全管理局(HSE，1992)规定的构成临时避难所缺失完整性的情况如下文所示：

- 支撑结构的缺失；
- 生命支持条件的恶化；
- 沟通和命令支持的缺失；
- 临时避难所栖身人群不可用的撤离方法。

挪威立法规定的避难区域(相当于英国的临时避难所)的损害是以同样方式进行考虑的，除了认为撤离是独立进行的，不可作为临时避难所的一部分。

对影响临时避难所的所有意外事件都进行了评估，而且有关每个事件的临时避难所“损害”概率的计算是与逃生通道的计算方法相同。评价应包括对可能出现的烟雾与气体侵入住宅区和临时避难所的研究。

临时避难所必须保持可居住性，直至居住在内的人员都已安全撤离。这意味着临时避难所必须保持不变的时间要长于通往临时避难所逃生通道的相应时间。

6.9.6.3　撤离系统的损害
Impairment of Evacuation System

每一起意外事件均就其主要撤离系统的易损性进行了评估。有时对于什

么是"主要撤离方法"有些模糊,因为各公司都倾向于认为直升机是"撤离的主要方法"。对于预防性撤离这通常可能是正确的,但对于紧急撤离很少是如此情况,特别是对于气体泄漏或火灾事件。在此类情况下,必须考虑救生艇作为撤离的主要方法。对于什么是撤离的主要模式不应该存在概念混乱,这是极其重要的。对于撤离的概念混乱显然是缘于 1988 年发生的帕玻尔 · 阿尔法油井事故灾难的高死亡率。

主要撤离系统的损害评估类似于对逃生通道的评估。救生艇的损害概率评估考虑了各种因素,包括可能发生爆炸的损害、大量热载荷和海上火灾等。

在评估救生艇损害时需要考虑许多因素。在某些场景下,撤离系统本身可能会承受其所暴露面对的意外载荷,从而使得使用救生艇的人员更易受伤害。因此,救生艇损害不一定仅受限于救生艇能经受住意外事故的影响。必须考虑的影响还包括以下内容:

- 烟雾影响:毒副作用以及能见度降低。烟雾显然不会影响救生艇本身,但撤离人员可能会无法使用救生艇,因其被笼罩在浓烟之中,或救生艇中可能充满烟雾。
- 热影响:玻璃钢救生艇可以容忍 10～25kW/m^2而不会受到严重影响或失去完整性。然而,如果救生艇暴露在 10～25kW/m^2 水平的高辐射范围内,气温可能上升比较快。这意味着,救生艇内的人员在较短时间内可能会暴露于令人无法接受的高气温中。

上述讨论主要是涉及救生艇仍挂在平台侧面的吊艇柱上。在救生艇放至海面上后,艇上内置的喷淋灭火系统本身能有效冷却救生艇。因此,可以忍受较高辐射水平而不受损害,除非热载荷非常高,或暴露时间太长。

由于将救生艇放下水所需时间通常很短,所以认为可忍受在这段时间内很可能超过 50kW/m^2的高温载荷。因此,决定是否可使用救生艇的限制因素常常就变成了需进入救生艇的人员的能力问题。在某些情况下,使用救生艇的权力是完全受保护的。

6.9.6.4 主要结构的损害 Impairment of Main Structure

涉及结构抵御载荷的能力,必须考虑高温载荷、爆炸超压载荷和主要支撑

结构(或船体结构,假如是浮式海上设施)撞击载荷的影响。第 8 章将更详细地讨论这一主题。

6.9.7 安全功能必须保持可用的时间 Required Intactness Times for Safety Functions

涉及损害需考虑的最后一方面为安全功能继续使用的所需时间。下列几方面为部分需考虑的安全功能完整性所需时间。

- 海上设施的应变部署时间其依据必须是人数和规模等,并对照演习结果(如果有的话)。对于大型平台上的紧急情况,20min 通常是用作标准应变部署时间(包括确认失踪人员),而对于较小型海上设施,有时使用 10min。
- 搜索和营救失踪/伤者所需时间必须包括在所需完整性时间内。对于大型平台,该时间通常约在 15～20min,对于较小型平台所需时间更短。
- 估计进入和常规救生艇下水所需时间通常约为 10min。预测所需完整性时间,除了正常的 10min 救生艇下水时间之外,通常还应允许增加前往另一艘救生艇以及该艇下水所需时间。对于更大型平台,可能要考虑使用几条小船撤离。通常认为全部持续时间需在 10～30min 范围之内,应视情而定。
- 直升机撤离所需时间通常不包括在作为救生艇撤离的替代方案内。直升机通常是用于预防性撤离,适合于时间充足的情况下,但不适合于关键时候的紧急撤离。直升机撤离时间依赖于直升机调用时间、机上座位数、至合适卸载地点(通常为另一海上设施)往返时间以及所需撤海上设施。如果一架直升机需撤离 100 多人,就可能需要花几小时。

可能会注意到有些时间计算相对简单,而其他时间(尤其是搜索幸存者时间)可能需要主观预测。

图 6.30 所示为在挪威离岸设备上演习时记录的应急集合时间(PSA,2006),作为时间函数。同时还显示了各海上设施的观测值以及趋势线。在平均在船人员总数(POB)与完成应变部署平均所需时间之间呈明确关联,包括人员状况的确定。当实施与所需应急集合时间相关的类似演习时,却根本就没有

明显的相关性可言。在此前提下的“所需应急集合时间”是营运方在应急管理系统中所定义的应急集合时间要求。

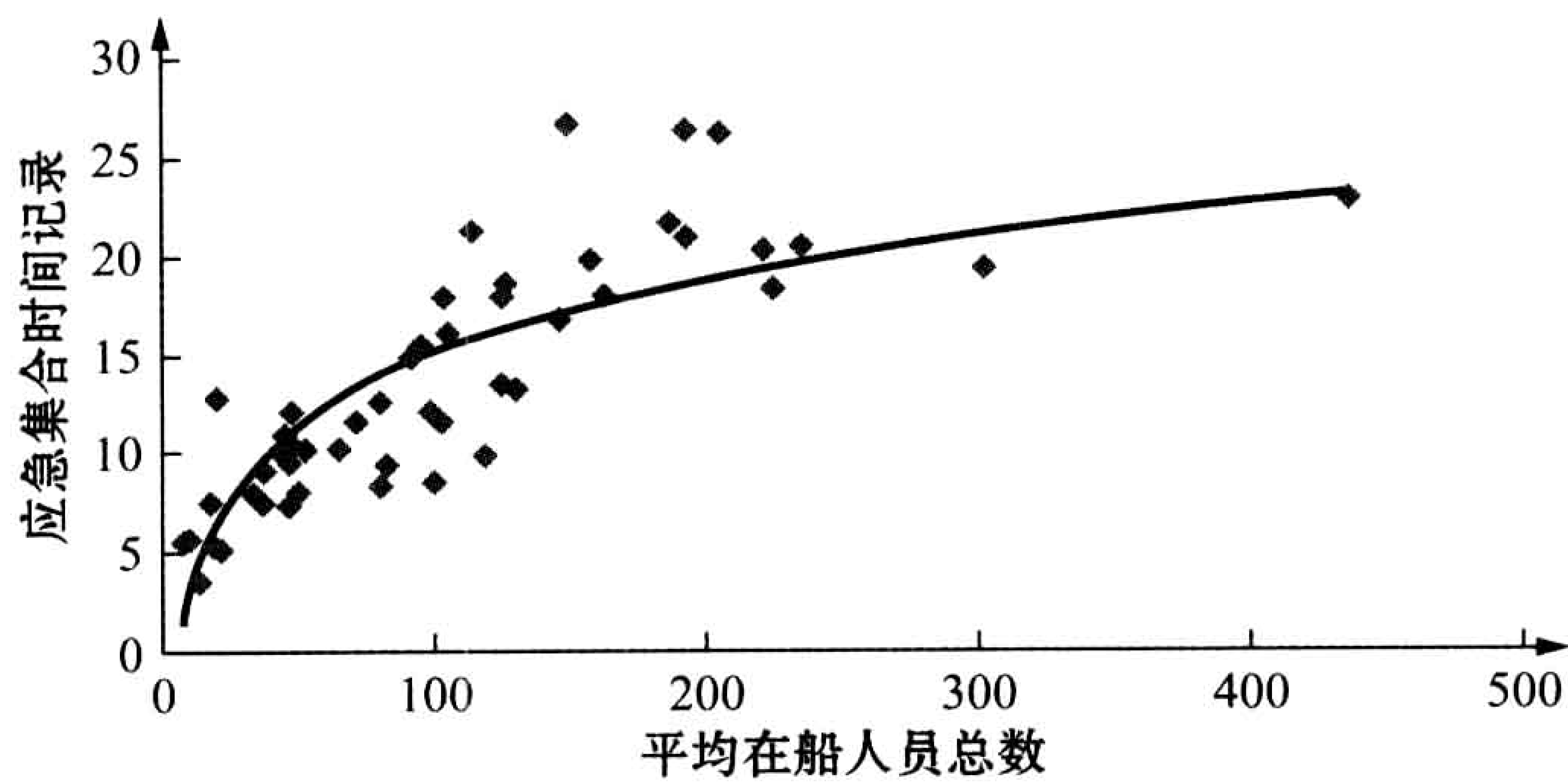


图 6.30 在挪威海上设施上演习时的应急集合时间记录，作为平均在船人员总数(POB)的函数

若要确定逃生通道完整性的时间要求，需要考虑以下内容。如果逃生通道需要有效时间抵达安全区域(或临时避难所)，并搜寻和抢救受伤人员，那么必需时间将在 10～30min 之间，但对于大型海上设施，最长可达 60min。

然而，逃生通道所允许的热载荷可能是基于几秒至 1～2min 的短暂暴露时间。此处论据表明，撤离人员都力争尽快抵达临时避难所，从而只会在短时间内遭受到高温载荷。然而，该做法将不允许有充足时间照顾受伤人员，以及可能必须等待援助才能抵达临时避难所(或安全区域)的幸存者。

如果最大热载荷是基于逃生通道的存在长达 30min，那么将只允许非常低的热载荷。这可能导致需执行大量不切实际的保护要求。

基于上文提出的假设(包括所有应变部署、搜寻和救援以及救生艇撤离时间)，小型平台安全功能所需完整性时间的标准值如下所示：

临时避难所：40min；

逃生通道：20min；

撤离方法：40min；

控制室：40min。

6.10　环境影响风险的分析
Analysis of Environmental Impact Risk

6.10.1　概述
Overview

由挪威船级社和挪威水电公司开发，并由 Sørgård et al.（1997）及 OLF（2001）描述的一种称为“MIRA”的环境风险分析方法，该方法根据有效资源和详细输入数据的范围，能以不同详细程度实施分析。该方法还能反映可比条件和/或类似研究的先前知识。这 3 种详细程度如下所述：

- 基于来源的分析：最简单的分析方法，基于释放持续时间和速率以及与海岸距离。
- 基于暴露的分析：较大范围的分析方法，基于释放持续时间、速率和数量以及石油漂移模拟。释放资源和作用视为在独立网格象限内，通常为 15×15km。
- 基于损害的分析：最大范围的分析方法，基于释放持续时间、速率和效果潜能以及石油漂移模拟。后果涉及最易受损害群体，包括海滩栖息地。

基于来源的分析最为保守，现已表明该分析方法可能约有一个数量级的频率过度预测。基于损害的分析最不保守，但该方法仍有明显的守旧性。基于来源的计算应作为第一轮快速分析，以确定是否需要进行更仔细的检查。另外，该方法可用于查找将以前的项目结果应用于相关新项目的可溯源方式。

6.10.2　环境损害度量
Measurement of Environmental Damage

经过仔细考虑，参与环境风险分析（MIRA）开发的团队注重于作为单个参

数量化后果的恢复时间。无论选择什么程度的分析方法，原则上都可使用该参数。但是只有在基于损害的分析中，恢复时间才是定量计算的。在基于来源的分析和基于暴露的分析中使用了更多定性和间接评估。

通过分析一些大量泄漏的实际数据（源自 Vinnem and Vinnem，1998），可以说明作为衡量环境损害的恢复时间，如表 6.7 所示。可以观察到所列示的意外事故中半数以上是由于油船或其他类型船舶所致。此外，所有持续时间最长的影响均由船舶所致。

表 6.7　一些大量溢油的恢复时间概览

溢 油 源	溢油年份	总溢油统计/bbls	注意到的恢复时间/年
埃克森·瓦尔迪兹号	1989	375～500 000	约 10
玛西娅商船	1989	?	4
路易斯安那州石油管线	1985	?	1
得克萨斯州石油管线	1984	?	2
阿莫科·卡迪兹号	1978	20 000	5～10
埃索·本妮卡(Bernica)	1978	-	9
埃科菲斯克·布拉沃号平台	1977	22 000	1
兹西斯	1977	-	5～10
阿罗	1970	7 000	5～10
圣·巴巴拉油田	1967	>8 500	1
托利卡·尼翁号	1967	30 000	5～10

可见溢油量与由此产生的恢复时间之间没有直接关联。已记录的最长恢复时间约为 10 年。表中所示的溢油恢复时间都超过 1 年，但这是因为基于只选择介绍了一些最大溢油事例。

恢复时间的预测仍然相对不可确定，因此，明智地分类表达时间，而不需要精确值。建议分类以下：

- 少于 1 个月；
- 1 个月至 1 年；
- 1 年至 10 年；
- 多于 10 年。

Søргård et al. (1997)使用了稍微细化的划分类别,其中较低类别分为3 个,而不是 2 个:小于 2 年,2～5 年以及 5～10 年。通常认为风险等级是“数量级”的表示式,并因此认为使用如上所述的“数量级”类别是最为明智的。

有时只有定性状态说明用于不同类别。此类定性描述可能与下列方式的时间间隔相关:

- 可忽略的恢复时间:少于 1 个月;
- 短期恢复时间:1 个月至 1 年;
- 中等复苏时间:1 年至 10 年;
- 长期恢复时间:10 年以上。

6.10.3　事件树 Event Trees

通常应用于环境风险分析的事件树往往比较简单,主要着重于可以确定非可控流持续时间方面的问题。能确定井喷持续时间的各类因素通常如下所示:

- 在发展至全面井喷前立即“压井”;
- 机械隔离溢流(“压顶”);
- 油库自停流(“桥接”);
- 钻探减压井。

井喷起火也是重要的间接因素,因为井喷起火将严重限制海上设施上人员的行动。在该情况下,可能会阻止或需要更长时间进行机械隔离作业。由于石油总量烧尽,所以溢流范围也会较小。

隔离作业很可能成功的另一重要因素系该油井是所谓的“干式完井”还是“湿式完井”,即井口和采油树是在平台甲板上(“干式”)还是在海床上(“湿式”)。海床上完井的油井机械设备安装将更为复杂,这意味着更高比例井喷可能需要钻探减压井。图 6.31 所示为溢油环境后果分析的典型事件树。

6.10.4 环境损害分布 Environmental Damage Distribution

环境风险将表现为上文概述的各分类环境损害频率。下面是完整频率的计算：

$$\lambda_{\text{damage},i}=\sum_{T}\sum_{J}\lambda_{\text{end},j}\cdot P_{A,j}(t)\cdot P_{B,jL}(t)\cdot P_{\text{damage},i,j}(t) \tag{6.9}$$

式中：

$\lambda_{\text{damage},i}$——损害分类 i 的损害频率；

$\lambda_{\text{end},j}$——图 6.31 的终点事件频率，即根据上述分类和有价值组分 j 指定持续时间的释放；

$P_{A,j}(t)$——时间 t 时所表示的面积组分 j 的暴露概率；

$P_{B,jL}(t)$——在时间 t 时有价值组分 j 的存在概率；

$P_{\text{damage},i,j}(t)$——分类 i 和时间 t 时有价值组分 j 的损害概率；

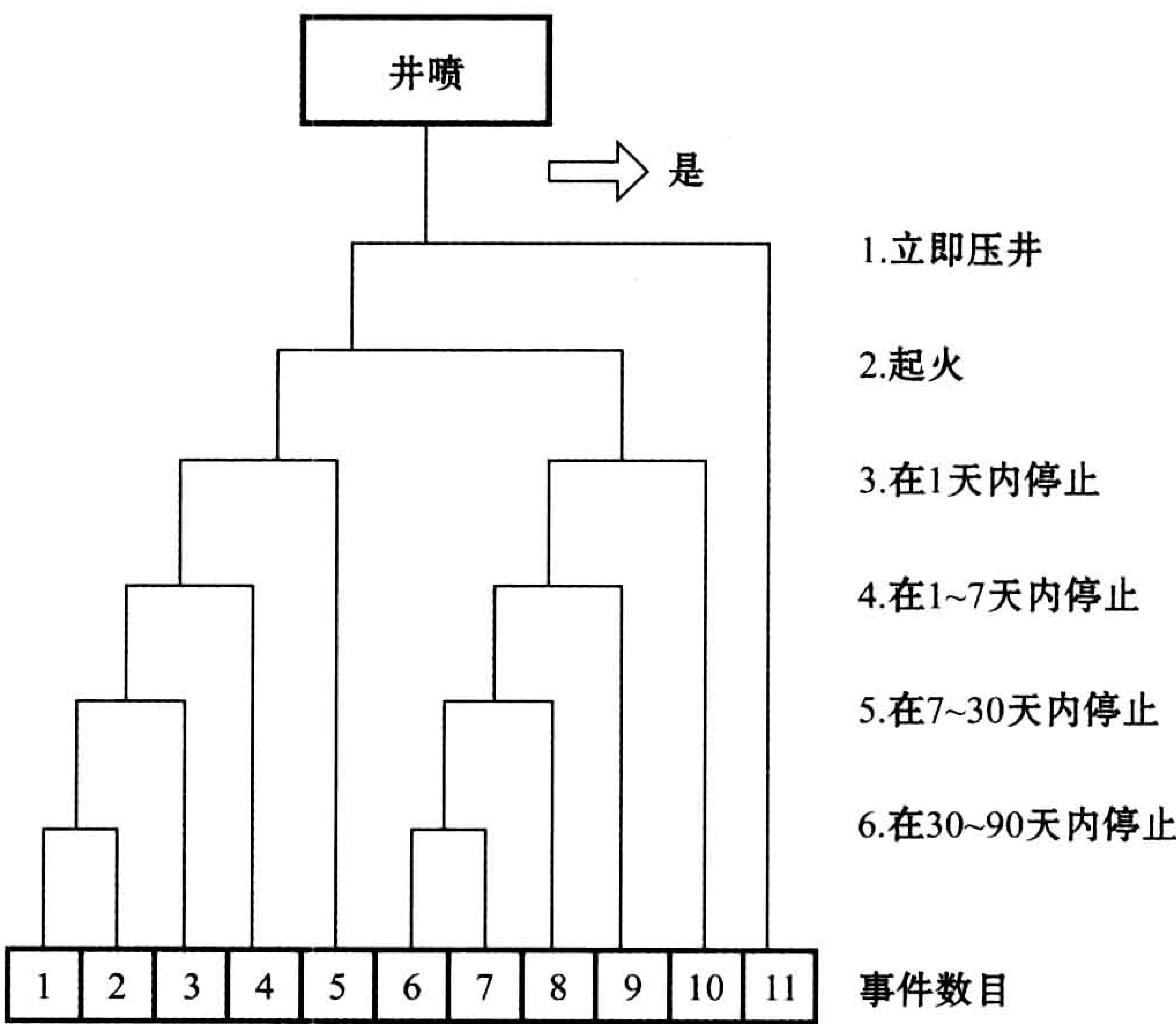


图 6.31 溢油分析通常使用的事件树

T——考虑损害概率的总时间；

J——有价值组分的总数。

实施环境风险分析(MIRA)的常见方法(Sørgård et al.，1997)是选择一些最脆弱的有价值生态组分(VEC)用于分析。然后分别考虑这些有价值生态组分(VEC)，于是就按下式 6.9 执行：

$$\lambda_{\text{damage},i,j} = \lambda_{\text{end},j} P_{A,j} \cdot P_{B,jL}(t) \cdot P_{\text{damage},i,j}(t) \tag{6.10}$$

式中：

$\lambda_{\text{damage},i,j}$——损害分类 i 的损害频率和有价值组分 j。

第 3.4 节讨论了该方法的一些弱点。对于分别呈现的 6 种不同的有价值生态组分(VEC)，图 6.32 所示为如何可以获得该结果的例子。

当分别考虑有价值生态组分(VEC)时，损害频率最高的是每年 6×10^{-4}，然而，如果每个有价值生态组分(VEC)的损害频率相加，其总量每年为 2.3×10^{-3}。其总和按式 6.9 所示。

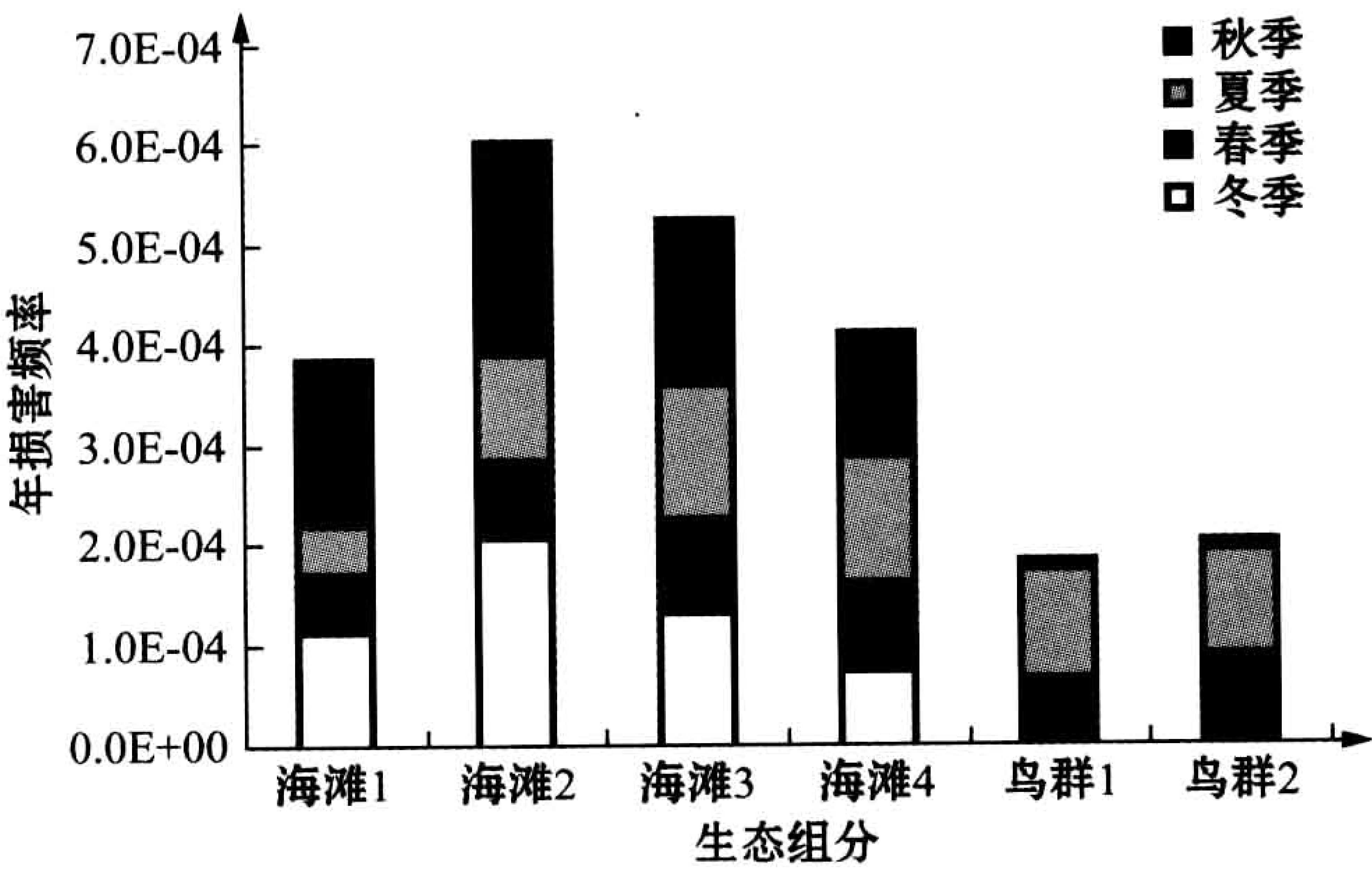


图 6.32　6 个生态组分的环境风险分析(MIRA)结果

第 7 章　死亡事故风险评估

Fatality Risk Assessment

死亡事故风险分析是完整的量化风险评估的关键要素之一。由于可用于该分析的重要部分数据量不足,并且有些结果存在着大量不确定性。因此,需要对关键要素进行深入讨论,并考虑各种可用选项以评估死亡事故的风险。

7.1　方法概述 Overview of Approaches

7.1.1　为何分析死亡事故风险? Why Fatality Risk?

描述人员风险实际上会毫无例外地着重于关注死亡事故风险,尽管事实上根据人员安全分析(PSA)的事故统计数字显示,近 10 年来勘探和生产中死亡事故与受伤事故的比例约为 1∶1400。所以,应主张将主要重点放在受伤事故上,因其所占比例非常高。

但是,正如本章所要证明的,死亡事故的建模是非常复杂的,也是一项十分艰巨的挑战。而且在量化风险评估中对受伤进行评估将会非常困难,并且可能会事倍功半。

还有一些忽略受伤的理由。量化风险评估主要着重于重大危险,并且在该情况下,受伤人数与死亡人数之间的关系可能有相对固定的平均等级(至少对于每次事故类型),虽然该比例是未知的。如果我们可以评估死亡事故风险并注重于风险降低措施,那么也就意味着我们将有可能减少受伤危险,尽管其范围或许有所不同。

当我们在谈论死亡事故风险时,特别是对于重大危险情况,不可能严格区分死亡事故和严重受伤事故,而且可能也没有意义这样去做。有时似乎可使用"伤亡事故"一词来包含死亡事故和受伤事故。在死亡事故风险评估中,死亡事故统计可能应更正确地认为是"死亡事故或严重受伤事故"。这可能对于风险评估并不是非常重要,但对于应急计划可能是颇有意义的。

应当承认,在本章中整篇所使用的"死亡事故"一词有时并不能很清楚地区

别究竟是指死亡事故还是受伤事故。

7.1.2 统计分析 Statistical Analysis

当统计数据库十分充足时就可应用于死亡事故风险的统计分析。数据库的范围必须确保与所需分析的目标相关。对于某一分析已完全可能应付的数据库,或许对于其他场景的分析就可能显得不够充足。如果事故的详细起因显得很重要,那么统计分析就远远不够了。

举例说明,涉及挪威海上生产设施的死亡事故统计足以用于计算职业危害所导致的员工平均死亡事故风险。第 3.1 节描述了该研究结果。如果需要描述不同行业之间的差异,那么就会因死亡事故数目太少而不能计算特殊群体工人的职业风险。

如果以往作业与计划作业直接相关,即没有引入新危害,在统计分析中的不确定性就可能较小。令人遗憾的是,事情并非总是如此。基于统计分析的死亡事故风险的计算通常会应用于职业危害、潜水危害和直升机运输危害的分析中。

7.1.3 基于现象的分析 Phenomena Based Analysis

对于事故现象的分析意味着是对事故因果关系机制的建模。也可以称之为基于物理建模的分析。通常需涉及逐步分析,特别是涉及一系列事件,包括火灾起因、火灾载荷、响应以及火灾载荷对人员的影响等。

若使用该建模方法,在重大事故中的人员行为可以描述成一系列连贯步骤,如图 7.1 所示。

图 7.1 显示了在发生重大事故的情况下,人们为了保护自己的生命所必须经历的各个步骤。在框图下方的词语说明需要对相关部分进行可能死亡事故的分析。

不确定性通常涉及每一步分析。与统计分析想比较,这可能会导致该类分析产生更高程度的不确定性。事实上,为了确定分析的具体水平,原则上可以使用不确定性。由于简化作用,在该事件中如果仅将其分成区区几个步骤,可

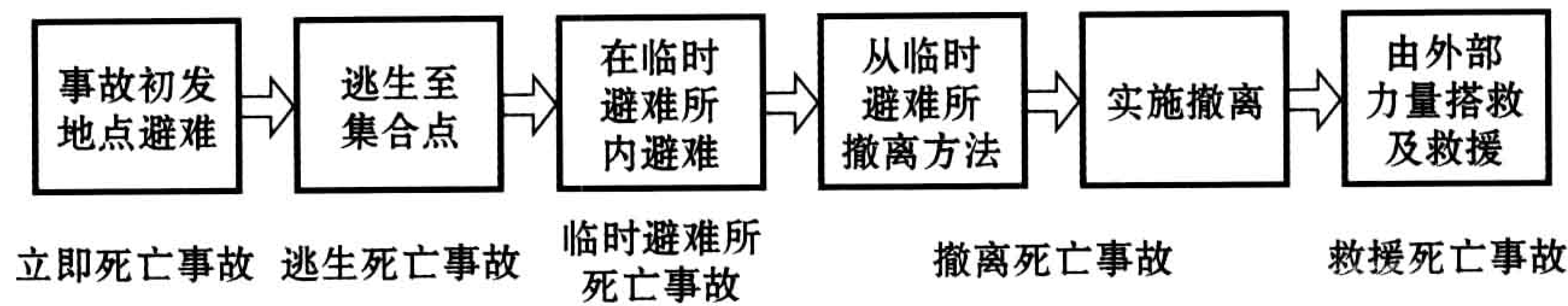


图 7.1 基于各相关现象的死亡建模全过程框图

能会有许多不确定性，然而却可能会有许多数据能应用于分析。与之相反，如果将该任务分成 20 多个或更多步骤，最终可能会出现大多数步骤没有数据可用的情况，从而又增加了不确定性。在这两个极端之间的某种程度建模可能会产生具有最小不确定性的分析。

重大危险通常是通过反映事故现象的方法进行分析，事故现象包括火灾、爆炸、碰撞和其他结构或外部撞击，以及涉及倾覆或沉没的海事意外事故。对于重大危险的死亡事故风险评估包含下列主要内容：

- 在紧邻事故发生地点的死亡事故评估。该评估通常是与各事件树和/或各事件树终端事件紧密相关。
- 在逃生、集合、撤离和搭救期间的死亡事故评估。该评估通常是通过对不同类别的意外事件进行单独分析而实施。

基于现象的方法通常必须应用于重大危险的死亡风险评估，因为统计基础远远不够。次要问题是平均死亡率将完全不能代表特定海上设施，因为与重大危险相关的死亡风险等级非常依赖于重大事故概率，并且这些肯定都是海上设施的特殊数据。

针对在紧邻事故发生地点的死亡事故，以及在逃生、集合、撤离和搭救期间的死亡事故的分析需要开发专用模型。下文将简要介绍此类模型。

7.1.3.1 立即死亡事故的分析 Analysis of Immediate Fatalities

“立即死亡”一词通常有双重含义，就“立即”意义而言，可解释为下列意思：

- 在空间位置上的“立即”，也就是死亡事故发生在事故起始位置，如在模

块上由最初喷射火焰所引起的死亡事故。该死亡事故通常也是在时间方面的“立即”。

- 在时间方面的“立即”，也就是事故起始时立即造成的死亡事故，如由于在庇护区的初始爆炸所引起的死亡事故。该死亡事故可能不会是在空间位置上的“立即”。

通常死亡事故分析包含了这两种立即死亡事故。至少有两种不同方法可用于评估立即死亡事故。即：

- 分析并与事件树节点相结合；
- 基于终端事件的独立场景建模。

在意外事故中的死亡人数依赖于意外事故发生时各模块和各区域的配员水平。因此，分析应该区分日班和夜班，并应考虑不同区域的人员配备水平。

7.1.3.2 逃生、撤离和救援的分析 Analysis of Escape，Evacuation and Rescue

紧急放弃海上设施的整个过程通常称之为逃生、撤离和救援(EER)。钻井平台的紧急放弃过程包括3个主要阶段(见图7.1)：

- 紧急集合阶段，即逃生至临时避难所，或救生艇站及临时庇护所；
- 撤离阶段，包括一级和二级撤离方法，并在极端情况下有三级撤离方法；
- 救援阶段，即救援幸存者并将其撤离至安全地方。

有时紧急放弃之前会有一个额外阶段，也就是在检测到危险情况后预防性地撤离所有非必要人员。应该对紧急放弃的整个过程进行评价，始于警报响起时，直至所有人员都安全地抵达岸上或乘坐上船舶，由直升机从海上救起，或已视为死亡事故。

涵盖所有这些阶段的综合模型将是相当复杂的，主要是由于平台条件以及外部和环境条件会有许多可能结果。根据生成特定场景的环境条件和故障条件的范围，在逃生、撤离和救援(EER)分析中通常采用统计模拟方法。

逃生、撤离和救援(EER)建模的出发点是确定在什么条件下预期会决定撤

离，以便于使用其作为模拟的基础。该资料可以从应急准备手册中获得，但经验表明很少有该情况。通常要求撤离的典型场景如下：

- 所有井喷场景（不考虑起火）；
- 事态加剧至其他模块的生产区域火灾；
- 所有大中型立管泄漏（不考虑起火）；
- 不论泄漏大小，立管泄漏起火；
- 在平台附近的大部分管线泄漏（不考虑起火）；
- 主要结构失效，以及关键部件的严重临界变形。

直升机通常作为撤离的首选方式，并且只要有足够时间，以及在允许使用直升机的其他条件情况下都会使用。直升机通常应用于预防性地撤离，因为在该情况下，对时间紧迫性的要求并不是很高。

对于未起火事件，在大多数撤离情况下都会使用直升机。恶劣天气和/或直升机起落甲板附近的气体云雾所形成的风险是避免在该情况下使用直升机撤离的主要因素。

对于起火事件，使用直升机撤离的比例明显偏低。其主要原因是可用时间较短和严峻的场景。对于结构性事件，撤离通常会使用救生艇方式，由于在该事件中可用时间较短。

救生艇撤离的结果（即成功或失败）往往可见巨大差异。这取决于撤离手段的可靠性和稳健性、天气条件、可用时间以及意外场景的变化。

7.1.4　死亡事故率值的平均 Averaging of FAR Values

死亡事故风险值通常都在各单独人员小组上求平均值或在海上设施全体人员上求平均值。另一典型方法是在所谓危险区域工作的所有人员上求平均值。该求平均值方法不可避免地掩盖了个体与小团体之间相当大的变化。

如图 7.2 所示，还可以按照海上设施不同区域来计算平均死亡事故风险等级。

平台上各区域的死亡事故率等级可能会有所不同。因此，在不同区域的工作人员将具有不同的死亡事故率等级。

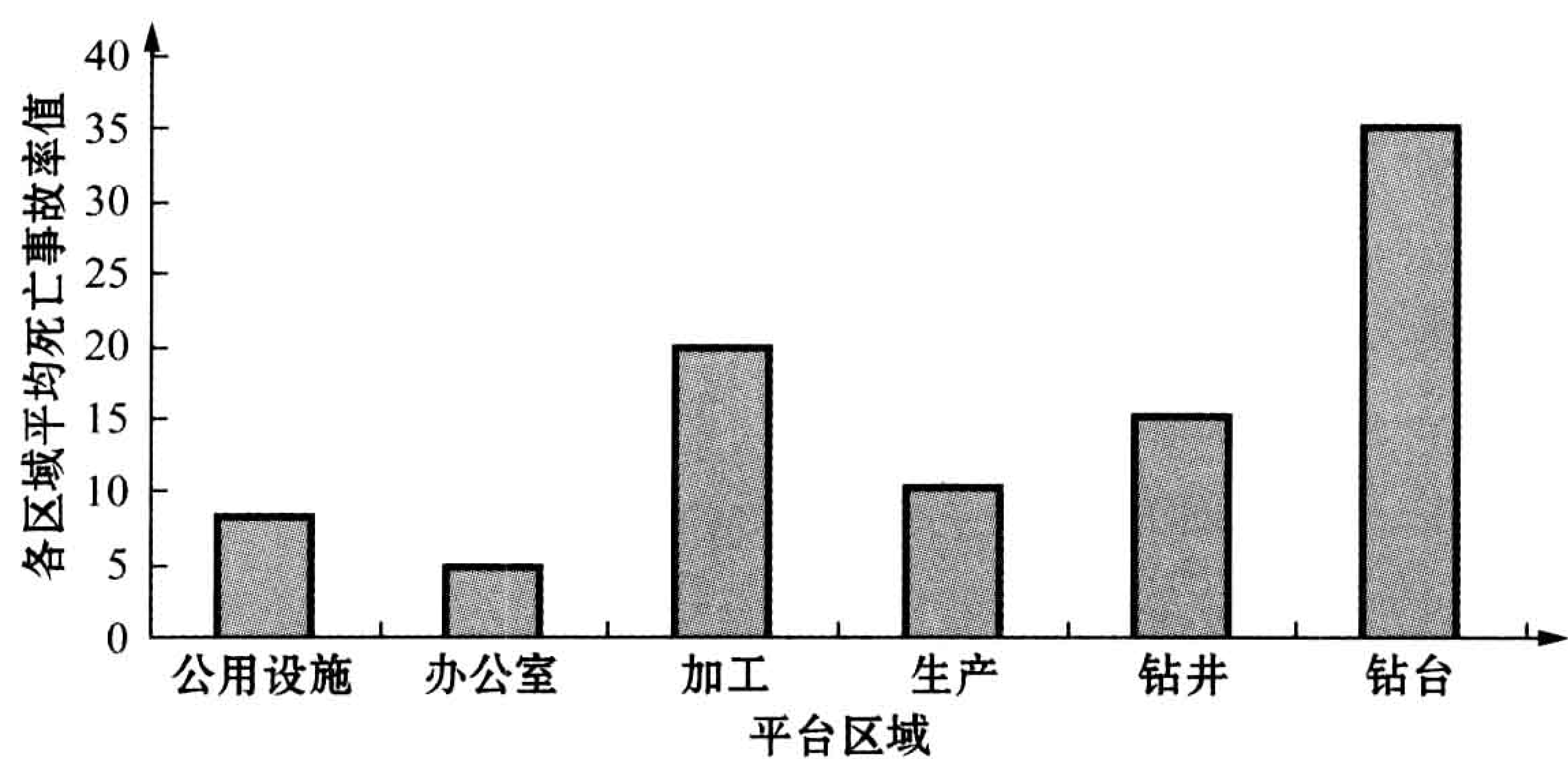


图 7.2 平台上不同区域的死亡事故率值

7.1.5 海上设施之间的不同 Variations Between Installations

多年来，在北海的大部分海上设施都进行了死亡事故风险等级的分析。由于海上设施设计年代、工艺和钻井系统范围、有无分开膳宿平台等的差异，此类等级显示出相当大的区别。图 7.3 显示了对不同海上设施所计算出的死亡事故率值。

该图所显示的死亡事故率值为平台全体工作人员的年平均值，没有考虑运送人员抵达和离开平台的因素。具体包含下列因素：

- 生产、钻井和生产作业，包括逃生、撤离和救援(EER)的影响；
- 未当班时膳宿区的意外事故；
- 职业性意外事故。

应该说明的是，图中各数值严格地说仅说明了大约 15 年前对此类平台进行的分析，自那以后已有相当大的修改。这些修改并没有反映在图 7.3 中。然而，该图指出了在不同平台风险等级之间存在的某些差异。还应该说明的是，图中所显示的平台是完全随机选择的。

在图 7.3 中呈现的一些差异可能是由于执行量化风险评估研究的不同组织之间的差异。已有经验表明，两个不同的组织分别对相同海上设施进行研究，所得出的结果可能会相差高达一半数量级(系数约为 3)。该差异是由于建模的不同、假设和分析前提的不同、简化和可能性数据等。在图 7.3 中的最大

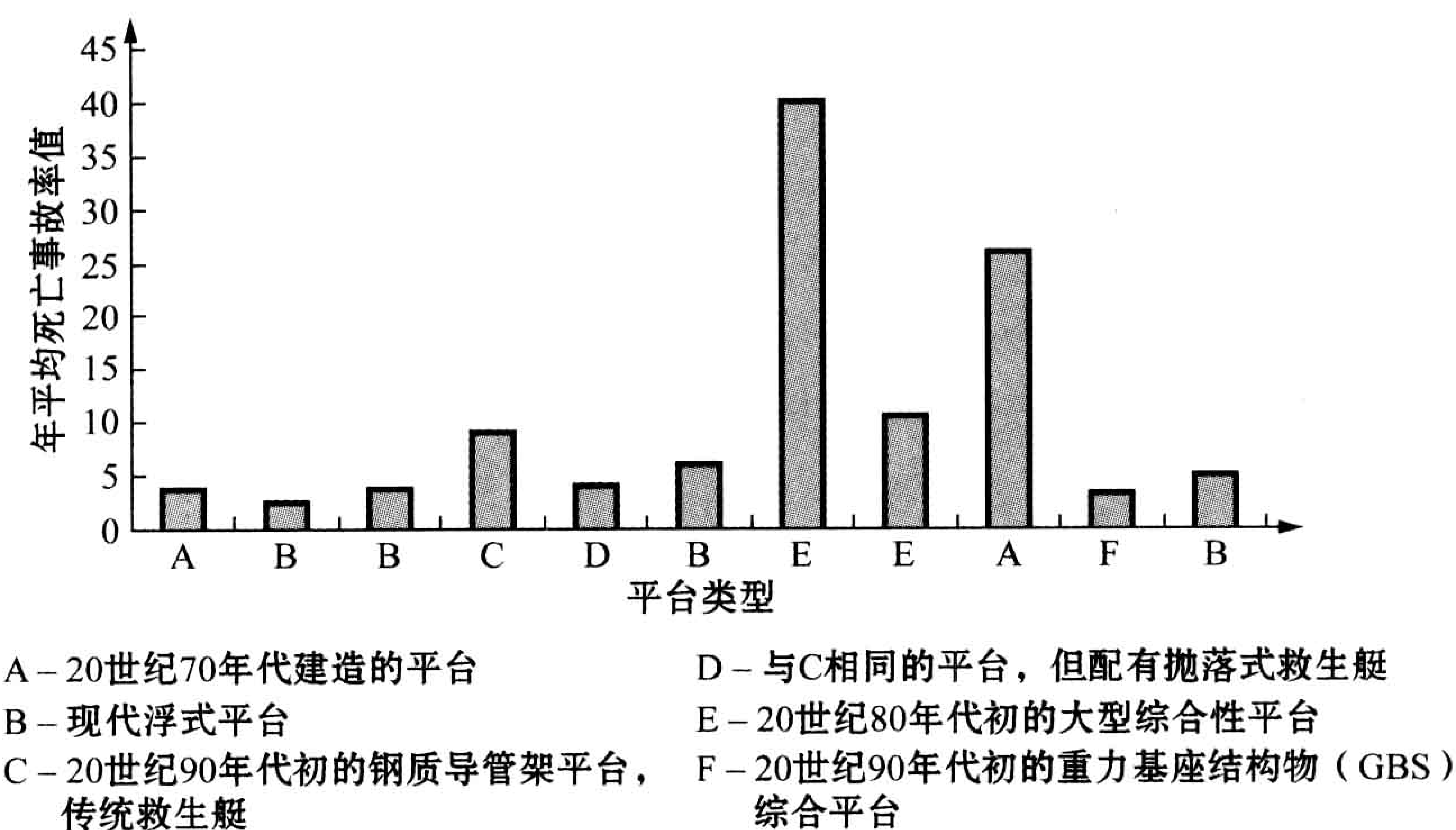


图 7.3　北海某些平台的死亡事故率值比较

差异要比两个不同组织之间的变化性更大。

该图表明抛落式救生艇的有效性对于平台(C)和(D)之间的差异所显示的风险等级有很大影响。此外,还可注意到历史最悠久的平台(A 型)配有传统救生艇。对于此处举例说明的两种情况,实际上由于海上设施是桥接式的,两者对于使用船舶撤离的需求均有限。平台类型(E)和(F)都有抛落式救生艇。

从风险角度可见即使基本在同一时期设计的平台也会有完全不同情况。因此,可能会提出社会所能接受的问题。唯一已知参考值是由英国健康与安全管理局在许多出版物上默认的每年 10^{-3} 为平均个人死亡事故风险的容忍上限值。当该数值转换至死亡事故率值时(见第 2 章式 2.6),图 7.3 中只有一个数值超过该限制。社会容忍度不在本讨论范围之内。

7.2　职业死亡事故风险
Occupational Fatality Risk

职业死亡事故风险通常是根据统计数据计算的。事实上几乎别无选择,因为没有可用模型能用于来职业意外事故现象的明确建模。

第3.1节有职业意外事故的详细统计数据，该数据可用于海上生产设施、移动式钻井平台和相关近海船舶。然而，由于有限的数据集，现有数据最适合于整个行业的平均值计算。因此，不同海上设施与不同行业之间通常是不能区别的。

或许能用于确立该区别的方法之一是假设受伤事故和死亡事故之间相互关联，接着使用特定平台或一组结构物的意外事故统计作为计算死亡人数的基础。然后从职业意外事故可推导出下列死亡事故率值：

$$FAR_{occ}^{i} = R_{av} \cdot H_{occ}^{i} \tag{7.1}$$

式中：

FAR_{occ}^{i}——海上设施i的死亡事故率值；

R_{av}——行业平均死亡事故率值与受伤事故之间的比例；

H_{occ}^{i}——平台i的受伤率。

式7.1是基于假设每一海上设施的受伤事故与死亡事故之间恒定关联。在考虑受伤事故时，必须注意相等程度的受伤事故，并同时包含平均等级和平台具体受伤率。自然要使用需向管理机构报告的受伤事故细节，以此作为特定平台或特定操作员的基础资料，然后，使用管理机构的平均统计作为R_{av}。挪威离岸业的受伤事故报告阈值在整个行业中是一致的。该情况比较独特，挪威其他行业不同公司之间并没有一致的报告阈值。

表7.1呈现了该事件的实例。该实例可以用来代替死亡事故统计的比较。如果多年来在现场没有发生职业死亡事故，那么就不可能直接比较死亡事故率。不过，有一方法是使用死亡事故、严重事故、轻微事故的三角关系来表示。虽然并不是很准确，但如果所有其他方法都失效，其能提供一些职业死亡事故率的指标。三角关系的使用可能与海因德里希（Heindrich）三角相类似（见Kjellén，2000）。

表7.1 操作员具体死亡事故率实例

	行业平均数	操作员平均数
受伤率（每百万工作小时）	27.2	31.4
死亡事故率（行业内平均/调整后操作员死亡事故率）	2.8	3.2

比较结果显示，在所考虑的10年期间内，操作员的统计数为行业平均水平

的 15%以上。因此，在计算死亡事故风险时做了相同调整，也增加了 15%。如上所述，为了使之有效，需要满足的条件是受伤事故与死亡事故之间比例要与相关操作员和和行业平均水平相同。

还有人建议，式 7.2 所表示的方法可用于确定特殊海上设施的行业具体死亡事故率，如下式所示：

$$FAR_{\text{occ}}^{i,j} = FAR_{\text{occ}}^{i} \frac{H_{\text{occ}}^{i,j}}{H_{\text{occ}}^{i}} \tag{7.2}$$

式中：

$FAR_{\text{occ}}^{i,j}$——海上设施 i 和行业 j 的死亡事故率；

$H_{\text{occ}}^{i,j}$——平台 i 和行业 j 的受伤事故率。

该式假设具体行业的死亡事故率与平均死亡率的比率等同于该职业受伤事故率与海上设施平均受伤率的比率。该假设是否合理尚值得怀疑。考虑到钻井工作人员和管理人员之间的差异，将这两个群体的受伤事故和死亡事故之间的比率完全等同是不合理的。

如果该比率取自于较大统计基数，那么该方法能以调整后的形式使用。然而，即使考虑最近 20 年来挪威大陆架的所有作业活动，该比率仍不适用于所有群体。最后建议选项是使用专家判断来创建此类比率。

7.3　立即死亡事故风险 Immediate Fatality Risk

7.3.1　概述 Overview

在第 7.1.3.1 中提到的“立即”一词涉及死亡时间和空间。立即死亡事故风险的建模主要与顶边区域始发的意外事故相关，最典型的是火灾和爆炸。当

支撑结构受到外部冲击，如发生碰撞时，立即死亡事故与逃生、撤离和救援(EER)死亡事故成为互不可分的部分，甚至到了无法区分的程度。

当我们关注顶边事件时，区分立即死亡事故与通常稍后会发生的逃生、撤离和救援死亡事故就变得不仅很有意义，还很有必要。例如，分析帕玻尔·阿尔法油井事故灾难，大概只有两三起死亡事故是由于初始爆炸所造成，而大多数死亡事故或许都发生在1h左右后，那些逃生至紧急集合区域的人员在试图逃离平台时窒息或死亡。

有两个稍微不同的方法可用于立即死亡事故的建模：

- 主观建模；
- 基于物理效应的建模。

主观建模是粗略方法，可以快速执行，并且是建立在分析师的假设值之上，没有特别的可追溯性。基于物理效应的建模具有较好的可追溯性，并且在某种意义上更致力于风险降低措施的效应可以明确地量化。在下文各小节中将讨论这两种方法。

7.3.2 主观建模 Subjective Modelling

主观死亡事故建模直接基于事件树，而死亡事故视为事件树内的相应节点，如发生爆炸、火灾或事态加剧等场所。图7.4为该方法的实例，其中在第6章中描述的中等气体泄漏事件树可作为例示。

当使用该方法时，通常不单独进行逃生、撤离和救援(EER)的分析，因为所有立即和稍后阶段的死亡事故都包含在主观评估内。通常在事件树内都可观察到该情况，在某种意义上，事态加剧就意味着有好几起死亡事故。在图7.4中显示了该方法。

然而，主观评估可能仅限于立即死亡事故，在本案例中需要基于可替代方案进行单独的逃生、撤离和救援分析。因此，将剔除在图7.4中所详细描述的事态加剧而引起的大量死亡人数，因为事态加剧在一段时间后才会发生，所以人们有足够时间逃离危险区域。使用简化方法计算潜在人命丧失(PLL)非常直截了当，式6.2作为起始点：

$$pll_j = \lambda_i \cdot \prod_K p_k \cdot \sum_K fat_k \tag{7.3}$$

式中：

pll_j——终点事件 j 对全部潜在人命丧失所起作用；

λ_i——事件树中初始事件频率；

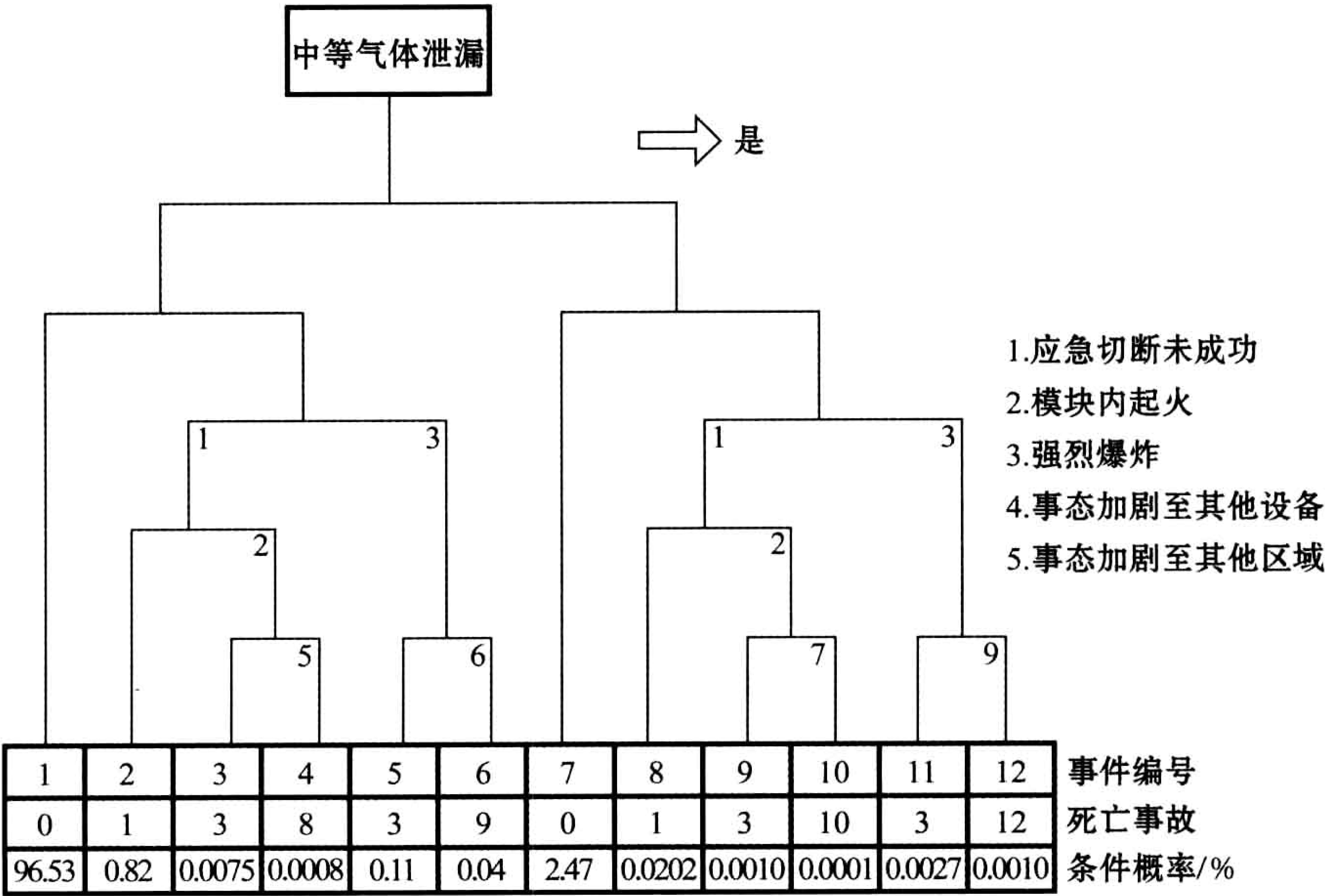
p_k——分支 k 的条件概率；

fat_k——节点 k 暗示的死亡事故；

K——确定从初始事件至终点事件 j 路径的分支组合。

在图 7.4 中的每个终端事件的数值是下列各项的总和：

- $\sum_K \text{fat}_k$
- $\prod_K \text{p}_k$



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	事件编号
0	1	3	8	3	9	0	1	3	10	3	12	死亡事故
96.53	0.82	0.0075	0.0008	0.11	0.04	2.47	0.0202	0.0010	0.0001	0.0027	0.0010	条件概率/%

图 7.4　主观死亡事故评估方法例图

然后，事件树对潜在人命丧失(PLL)所起的全部作用就按下式计算：

$$PLL^{i} = \sum_{K} \lambda_{j} \cdot pll_{j} \tag{7.4}$$

式中：

PLL^{i}——事件树 i 对潜在人命丧失所起作用。

J——事件树 i 的终端事件总数。

主观死亡事故建模能快速且容易地进行，并且也可以在电子数据表中方便地实施，假如用该格式完成风险计算。因此，该方法适用于获得死亡事故风险的近似计算。

该方法的主要缺点是完全主观的，并且通常没有正式文本记录，就其意义而言，用于计算每个节点的死亡事故各因素是无正式文本记录。因而也就无可追溯，并且其可再现性也成问题，因为即使让同一位分析师重复多次实施该评估可能也得不到相同结果。由于缺乏相关文本材料和可再现性，在评估风险降低措施的效应时，该方法不适合于进行敏感性研究。

该方法有许多缺点，但应该意识到因其可以快速完成建模，该方法仍然相当受欢迎。

7.3.3 基于物理效应的建模 Modelling Based on Physical Effects

7.3.3.1 一般建模方面 General Modelling Aspects

主观方法的缺点可以通过采用基于事故场景所引发的物理效应的建模方式来克服，即几何因素、热载荷、爆炸载荷和冲击(无论是碎片、设备或结构要素)。设立基于此类物理效应的模型之目的在于：

- 尽可能真实地反映物理过程及其对人员的影响；
- 实现可追溯和可再现模型公式化；
- 使模型能验证有关实验数据和/或统计数据；

- 实现能有效评估风险降低措施的可能效应的模型公式化。

涉及死亡事故的物理建模所需要解决的一些因素与事件树建模中的常见缺陷相关。如果使用非常详细的事件树或更先进的技术，下列提议所包含的一些死亡事故模型中的因素可能已经包括在意外事故场景建模内。死亡事故建模应考虑的因素需包括：

- 对人员的热载荷，考虑火焰直接朝向该区域工作人员的概率；
- 对设备和结构等引发的意外事故影响设置屏障；
- 在起火前完成从启动区域逃生的概率；
- 发生二次爆炸，即沸腾液体膨胀蒸气爆炸（BLEVE）；
- 对邻近区域产生的即时效应；
- 对起居舱室及其他安全区域产生即时效应的概率；
- 每个区域的人员分布，根据具体时刻和操作阶段等情况考虑各种变化。

人员分布可能是逼真建模的特别困难之处。人员分布的主要影响是在事故发生时，白天期间或换班时人员不是平均分布的。经常有人断言意外事故与人类活动密切相关。例如，通常假定所有意外事故的 80%～90%是由人员导致的，虽然为保住该比率，不得不在广义上使用“因果关系”。

如果人员涉及所造成的事故，在某一区域使用人员平均分布很可能会导致没有充分表现风险对人员的影响。可以考虑比较高度集中的人员接近最初事故起源地点，但涉及气体泄漏，也有反对该假设的许多方面。

- 一旦检测到泄漏，只有当起火发生在泄漏起始的几秒钟内，人员才可能无法逃生；
- 偶发事件已表明，有些人可能会赶往泄漏源，以试图控制泄漏；
- 人们有时可能会接到命令去核实报警确实是真的，而不是误报警。

如果认为人员过多是有效的，在事件树中还应反映另一方面。如果人员都在现场，那么人工检测泄漏的可能性或许会设置为 1.0。

这情况可能是惊人的，但是涉及人员受伤的意外事故的不断重复发生是因为人们赶往泄漏源（显然没有反省），以试图控制泄漏或停止运行。正是由于该

原因，很可能大部分人员立即遭受到受伤或死亡的威胁。（作者能清楚地记得一位平台经理曾经这样描述他如何为了隔离仪器泄漏而进入一间舱室。泄漏气体的浓度是如此之高，以致几乎无法呼吸！）这种倾向强烈支持该假设，即在紧邻意外事故处的人员密度高于人员平均密度。

总而言之，相对于换班时的平均人员分布，假设在紧邻意外事故处的人员密度较高可能是有根据的。确定哪些将很可能会增加是一个困难问题。有时使用过分简单化的假设，包括假设该区域的所有人员在起火时都遭遇死亡。然而，有争议说该假设是过度保守评估的表现。

7.3.3.2 建模的原则 Modelling Principles

可能是只有想像的局限性，限制了由于火灾和爆炸产生的各种影响而使死亡事故因果关系的模型有多高级。同时，如模型必须重复成千上万次，则其必需逼真，并具有合理计算时间。在量化风险评估中通常包括的建模类型可通过举例说明。

设想一次约 1kg/s 的少量气体泄漏，在模块中某一处也已起火。由此产生的火灾可简单地假设为弥漫气体火灾。假设已经生成了事件树。该例子将考虑特定分支 k，以及已经计算了涉及该终点事件和已知或假定起源（泄漏源）的辐射水平。

在分支 k 的死亡事故现可表示如下：

$$fat_{\mathrm{k}} = \sum_{P} \sum_{X_{\mathrm{m}}} \sum_{Y_{\mathrm{m}}} p(x,y) fat_{\mathrm{heat}}(x,y) A^{*}(t) \qquad (7.5)$$

式中：

fat_{k}——分支 k 的死亡事故数；

$p(x,y)$——人员所处位置；

$fat_{\mathrm{heat}}(x,y)$——人员所处位置(x,y)死于热载荷的概率；

$A\ (t)$——调整系数，随时间变化；

P——模块内人数；

$X_{\mathrm{m}}, Y_{\mathrm{m}}$——模块坐标。

例如，概率值可以确定如下：

$$fat_{\text{heat}}(x,y)=\begin{cases}1, & if\ (x,y)\in A^{i}_{R1}\\ \text{线性增加 } 0\sim1, & if\ (x,y)\in A^{i}_{R2}\\ 0, & if\ (x,y)\text{ 在 } A^{i}_{R1}\text{ 之外}\end{cases}\tag{7.6}$$

式中：

A^{i}_{R1}——在起源内圈周围区域具有(最高)热载荷 $R1$；

A^{i}_{R2}——在内圈外的圆环区域具有(较低)热载荷 $R2$。

热载荷 $R1$ 和 $R2$ 是基于人体耐受性限制而确定的，请参阅第 6.9.5 节。$R1$ 和 $R2$ 的典型热载荷可分别为 $50kW/m^2$ 和 $20kW/m^2$。

时变调整系数 A＊(t)可与时变起火概率结合，以反映在该区域的人员可能会有时间逃生，以及其他人员可能已经抵达并试图隔离泄漏。

由于爆炸的死亡事故建模通常使用相同方式实施，即使用式 7.5 和式 7.6，只需将“爆炸冲击波”替代“热”就可。现在极限 $R1$ 和 $R2$ 可理解为爆炸冲击载荷。原则上此类载荷应基于人体耐受性极限而确定。这不像热载荷那样简单。爆炸冲击波导致死亡所需载荷是相当高的，通常其过压为 3～4bar。但碎片和结构失效可能会间接影响人员，如遭到砸压，或无法逃离随后发生的火灾。因此，此类载荷通常是基于主观评估。其标准值可为：

- $R1=0.5$bar；
- $R2=1.0$bar(见 OGP，1996)。

7.3.3.3　物理建模的适用性 Suitability of Physical Modelling

对于不同分析师(甚至同一分析师在稍后时间)要重现涉及事件树中节点的主观分析通常并不是很容易的。基于分析的场景当然会更容易地重现，因为大多数(即使不是全部)系素的评估是基于明确的方程式，以及物理因果关系各方面和各类载荷。然而，因其更为复杂，对于审阅者追溯所有细节就有可能会更加困难，这是略显不足之处。但如果是完全使用文本记录的分析，就不应将其视为物理建模的真正不利条件。

7.3.4 标杆需求
Is there a Need for Benchmarking

近年来，在量化风险评估中所使用的个别模型已有相当大的改进。特别是已经包含了火灾和爆炸载荷建模，而且还包含了泄漏频率和起火等的建模。尽管该方面已有改进，死亡事故建模似乎并不是人们感兴趣的主题。人们感觉到多数量化风险评估专家都认为死亡事故建模是“数字游戏”，并不一定需要非常认真地去对待，因其不确定性太高。

这很可能是正确的，即多数专家都认为在量化风险评估研究中死亡事故风险建模是最不确定的因素。然而，许多离岸作业人员都将各自的风险接受标准与死亡事故风险值相关联，以死亡事故率值和平均个体风险（AIR）值或频数（f-N）分布等来表示。量化风险评估顾问通常可能不会认可由于粗糙的死亡事故模型隐含着过度表示死亡事故，风险减少措施可能会产生相当大的成本。简要和有限的比较工作概括如下，以评估该问题的严重程度。

7.3.4.1 在重大事故（爆炸）中立即死亡事故的概述
Summary of Immediate Fatalities in Major Accidents—Explosions

在北海生产设施上发生火灾和爆炸的立即死亡事故的简要统计分析在1973年至1997年期间得到了实施（Vinnem，1998）。这是确定下列意外事故数目的基于爆炸的分析：

- 小于0.2bar的过压爆炸：23起；
- 在0.2～1bar之间的过压爆炸：7起：
- 在1～2bar之间的过压爆炸：2起。

图7.5和图7.6是基于此类事件的分析。

首先，应考虑所有案例的数目。其中有23起事件认定为发生在低于0.2bar的过压类别内，7起事件发生在0.2～1bar之间的过压类别内。在这两个类别内有充足的案例具有统计意义（在第二类别的边界线上）。在最高过压类别中只有两起事件，其中一起发生在正常运行时（无人死亡，有4人受伤），另

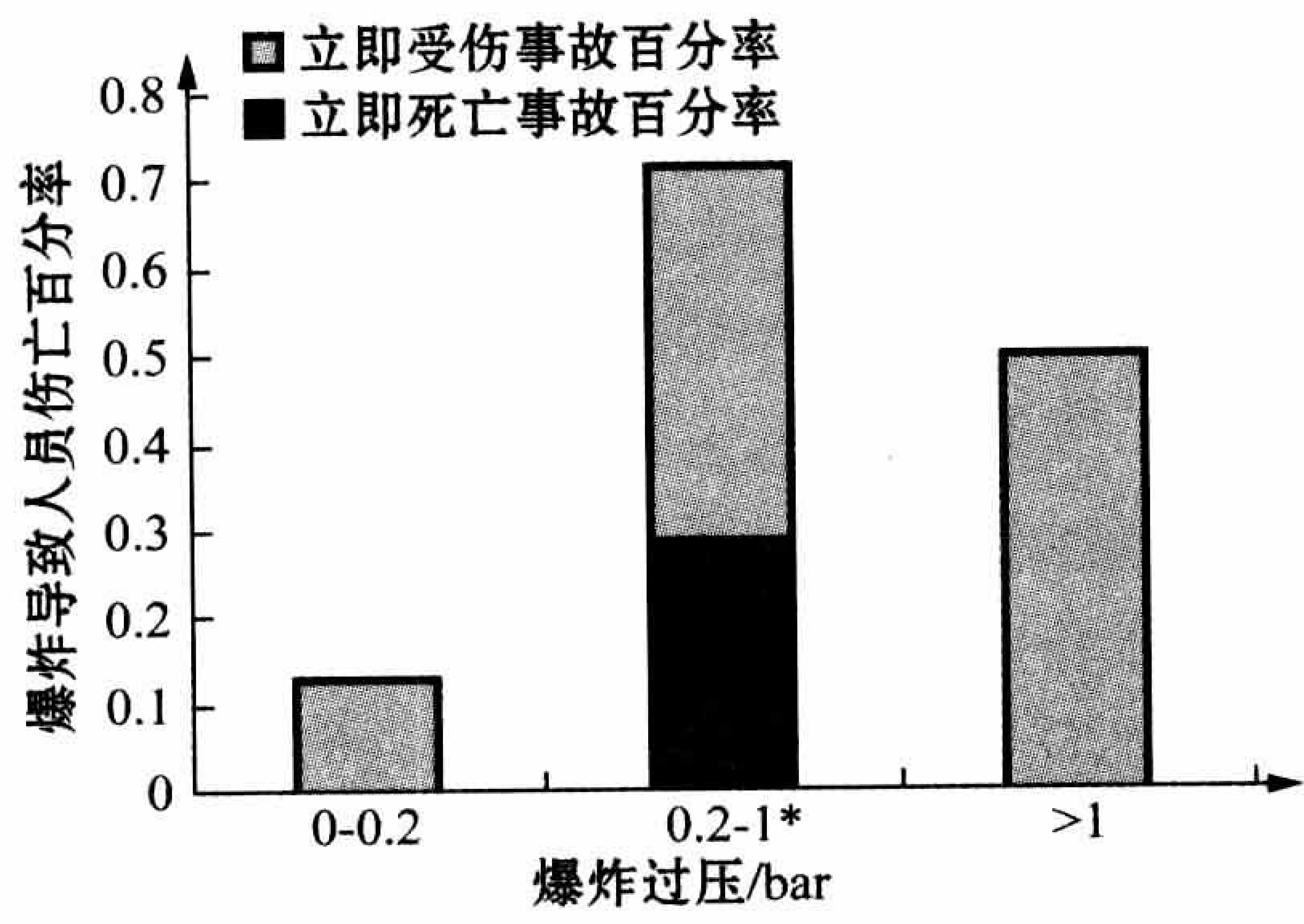


图 7.5　爆炸导致立即死亡事故和受伤事故百分率

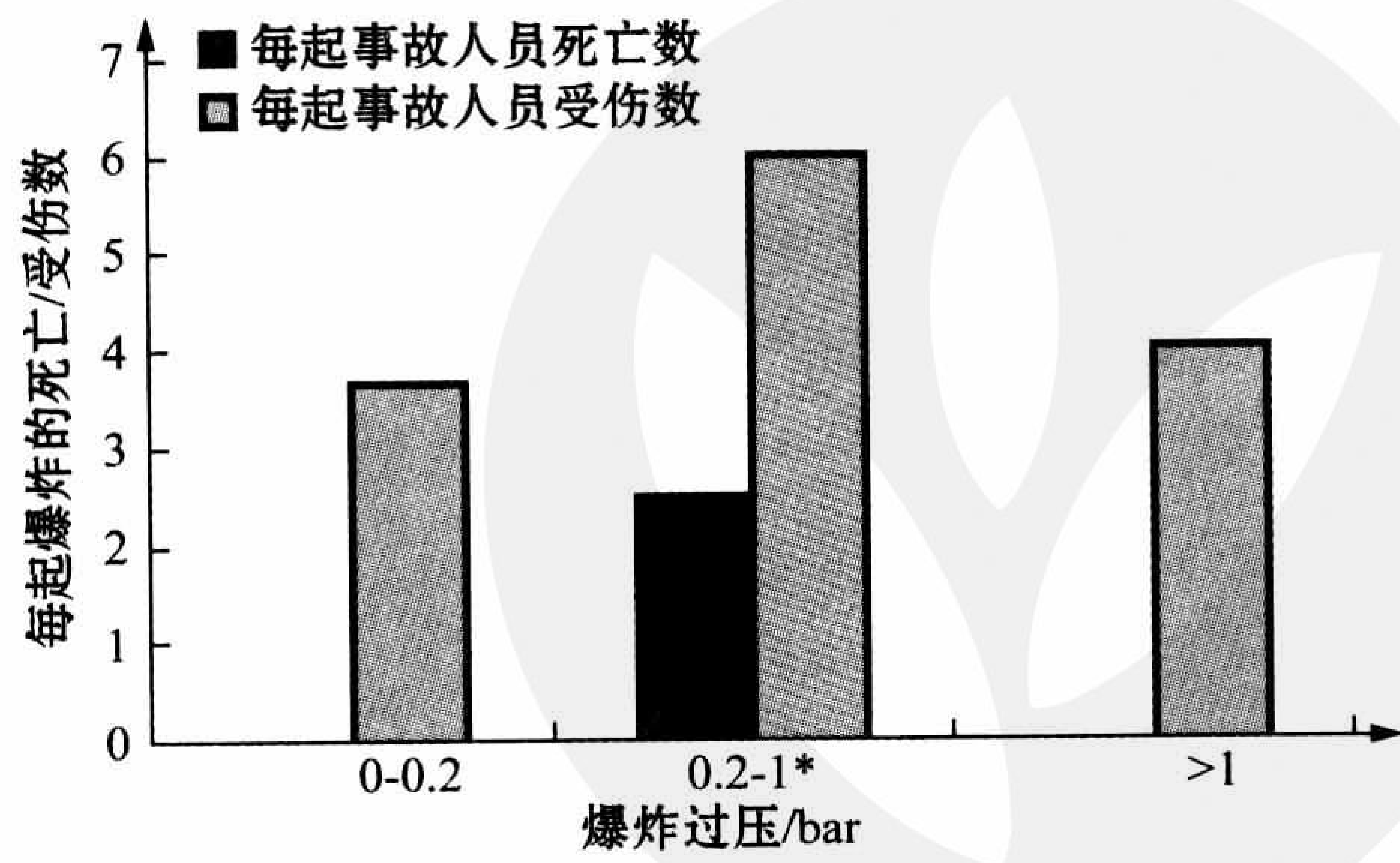


图 7.6　每起人员伤亡事故立即死亡和受伤数

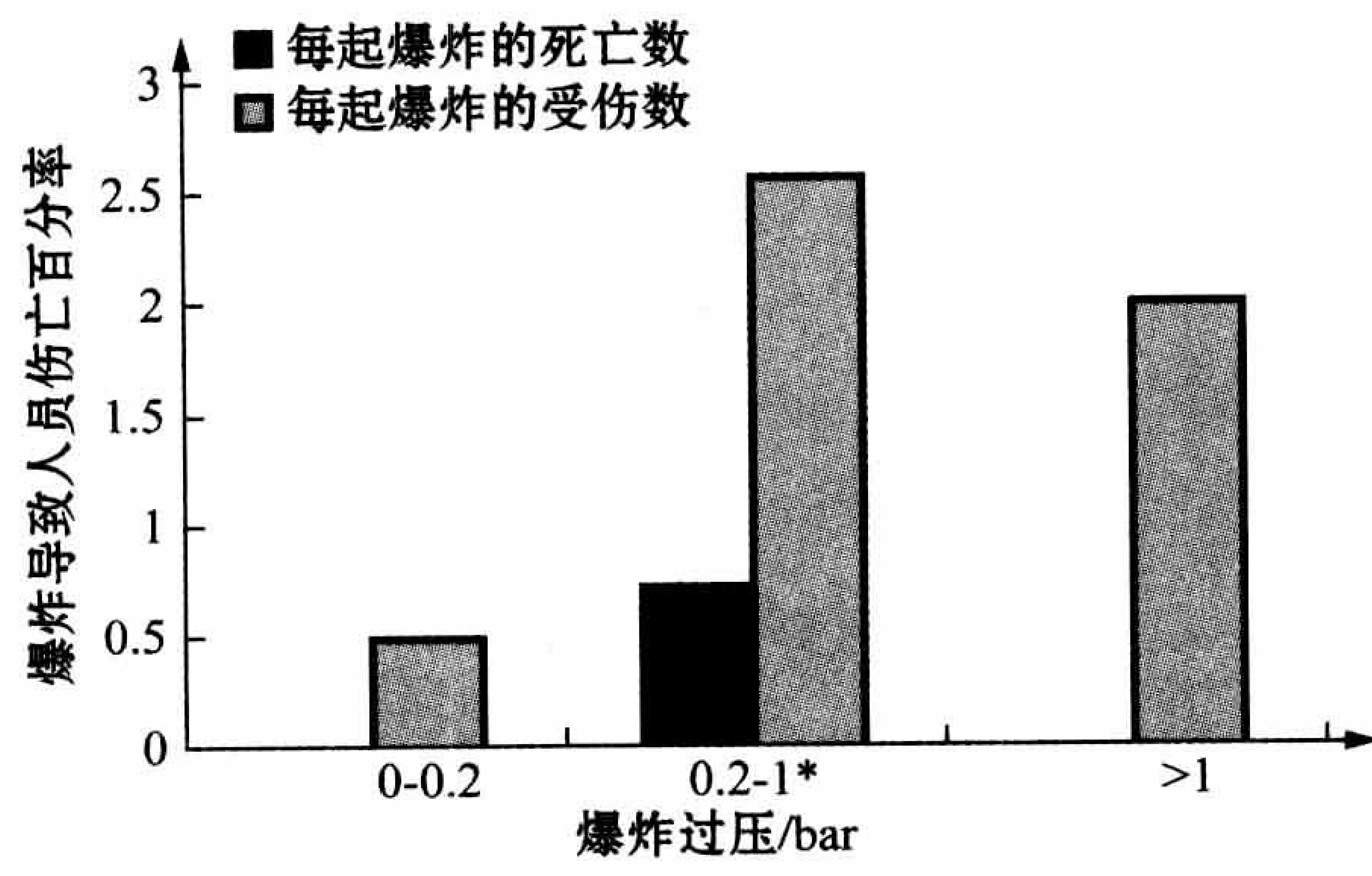


图 7.7　每起爆炸的死亡和受伤平均数

一起发生在停机状态的非常特殊情况下(无人死亡或受伤)。对于最高类别中数值的统计意义非常有限。因此,该类别几乎完全可从下面讨论中剔除。

可能会有些惊讶地发现,死亡事故只发生在0.2～1bar的过压类别内。在两起过压约为1bar的案例中,其中一起有几方面都相当特别。在泄漏发生后几小时气体云雾才起火,并且完全是凭侥幸才无人在爆炸中受伤。

在0.2～1bar类别案例中有一起就是帕玻尔·阿尔法油井事故灾难。有人认为,根据从不同来源的迹象表明可能有两人在初始爆炸中丧生(或至少是很严重地受伤,以致无法逃离随后的火灾)。在分析中包含了这两个死亡数。但没有涉及受伤的信息,因而,在分析中没有包含帕玻尔·阿尔法油井事故灾难中的受伤数。

值得注意的是,在0.2～1bar范围内发生爆炸过压的案例中只有29%出现死亡事故。如果把死亡数和受伤数都算在一起,就可观察爆炸事件发生人员伤亡的占71%。当死亡事故发生时,平均有2.5人死亡,当受伤事故发生时,平均有6人受伤。对于最低一类,没有发生死亡事故,受伤事故发生的百分率为13%(共有3例),每起案例平均有3.7%的受伤率。其中一个案例相当特别,气体飘移至车间(无类别区域)并被明火点燃。7人全部受伤。该事件发生在20多年前,并不能考虑其代表现行标准。不含该事件的受伤平均数可能每起案例仅有两人受伤。

7.3.4.2 在重大意外事故(火灾)中立即死亡事故的概述 Summary of Immediate Fatalities in Major Accidents—Fires

对火灾事件进行分析比较简单化,其结论也更容易描述。首先,明显可见火灾可分为下列两个类别:

- 局部火灾,也就是仅限于火灾起始处的设备;
- 涉及事态加剧至另一模块或更多模块的火灾。

需对这两类火灾的确切数目进行检查,以剔除那些因爆炸而发生的事件。结果发现有13%的局部火灾起源于初始爆炸,而53%的事态加剧火灾起始于爆炸。表7.2所示为非起始于爆炸的案例。

表 7.2　自 1973 年至 1997 年火灾事件人员受伤和死亡数概览

伤害种类		火灾	死亡事故	受伤事故	立即死亡事故	立即受伤事故
局部	事件	27	0	3	0	3
	死亡事故		0			
	受伤事故			5		
一个模块或更多模块	事件	7	2	1	2	1
	死亡事故		9		9	
	受伤事故			7		7

在局部火灾的情况下，27 起事件中有 3 起导致“立即”受伤，但没有造成死亡（无论是“立即”的，或是在撤离时）。有两起火灾并不一定能代表顶边碳氢化合物火灾，因为其中有一起火灾是发生在 1995 年的电气火灾，另一起是发生在 1988 年的船上厨房火灾。唯一涉及顶边碳氢化合物火灾导致人员伤亡事故的是发生在 1989 年挪威平台上的原油输出泵，实际上，该事故中的受伤程度相当轻微。

对于火灾事态加剧至整个模块（或更多模块），7 起案例中有 2 起导致立即死亡。然而，在某种意义上这 2 起火灾都相当特殊，都是混凝土竖井内造成的死亡事故。其中一起发生在 1978 年挪威国家湾 A 平台，导致 5 人死亡的火灾，另一起发生在 1984 年布伦特 B 平台，导致 4 人死亡和 7 人受伤的类似火灾。这些伤亡事故中没有一起是能真正代表顶边火灾事故。因此，可以认为即使是事态加剧的火灾，没有因顶边碳氢化合物火灾而导致发生人员伤亡事故。为了校准目的，所有火灾将不得不考虑作为同一类。

7.3.4.3　总体观点
General Observations

有关火灾偶发事件，可提供下列总体观点：

- 在北海生产设施上碳氢化合物起火泄漏导致人员伤亡事故少的令人惊讶。
- 有迹象表明，在发生伤亡事故的情况下，美国墨西哥湾的平均百分率大大高于北海的平均百分率，其差异可能具有统计意义。
- 对于风险分析建模，死亡事故和受伤事故概率都应尽可能一样平等地考

虑。伤势是否非常严重，是否会导致其死亡，都可能是随机的。

- 对于轻微爆炸，似乎约有15%的案例会发生人员伤亡事故。平均每个事故的伤亡人数为3.7，然而，发生起火的区域/房间类型对其会产生很大影响。在此类情况下，有人可能认为受伤会比死亡更容易发生。
- 对于强烈爆炸，有人可能断言约有33%的案例会发生人员伤亡事故，虽然数据基础相当有限。无法计算平均伤亡人数，但很可能会在10左右（或更多），并且很可能会受到帕玻尔·阿尔法油井事故的强烈影响。死亡似乎会比受伤可能性更大，但在大多数案例中，死亡事故很可能主要是由爆炸后的火灾所造成。
- 对于未发生爆炸的火灾，约有10%涉及顶边碳氢化合物区域的案例会发生人员伤亡事故。每起火灾的平均人员伤亡数为1.7人。此类事件最有可能只造成人员受伤，虽然理论上讲有很小的发生死亡概率（不切实际，因为没有发生过）。

7.3.4.4 量化风险评估结果的比较 Comparison with QRA Results

表7.3提供了从一些随机选择的量化风险评估研究中获得的每起爆炸案例平均死亡数的比较，以及自1973年至1997年期间北海意外事故统计数资料中的平均值。

表7.3 随机选择的量化风险评估研究中每起爆炸案例死亡数与事故统计的比较

量化风险评估研究	每起爆炸偶发事件的平均死亡数
研究 I	1.38
研究 II	2.19
研究 III	1.95
研究 IV	0.057
1973年至1997年北海平均数	0.15

这一比较仅限于爆炸立即死亡数，但是可能很难区分在初始爆炸中的死亡，还是可能在初始爆炸中受伤而导致不能逃离随后火灾的死亡。事实上有迹象表明，在北海爆炸中的所有实际死亡数都是由于随后火灾所造成。

此类量化风险评估研究清楚地表明，如与实际事故统计数作比较，爆炸场景死亡数的计算是相当保守的。

7.4　逃生风险分析 Analysis of Escape Risk

7.4.1　概述 Overview

“逃生”一词有时还有不同解释。此处选择的解释是与挪威石油标准化组织(NORSOK)采用的风险和应急预案分析规范是一致的。逃生阶段是说明在意外事故或偶发事件发生时所有人员从他们工作场所撤离至指定集合点的情景(见图6.5)。集合点通常是救生艇站或临时避难所/庇护区(依照英国或挪威术语)。

成功地逃生至集合区域需取决于多项因素，其中包括：

- 发生事故的位置；
- 发生事故的规模；
- 热载荷和烟雾；
- 持续时间；
- 事态加剧；
- 风向；
- 热量和烟雾防护；
- 逃生路径和楼梯的容量；
- 特定甲板上的可选路径，以及至上甲板或下甲板的路径。

该逃生评估主要关注火灾事故，包括爆炸事故。在下文描述中通常假设在人群与集合区域之间存在大火。如果情况并非如此，逃生分析就变得无关紧要。

当发生爆炸时，起火时间确定涉及在逃生阶段的各种情况。有时可在起火之前逃生，在该情况下逃生分析是微不足道的。如果情况并非如此，那么须看爆炸后是否会导致大火。如果没有大火，逃生路径仍有可能因爆炸影响而被堵塞。如果没有发生火灾，逃生也就没有紧迫性，并且即使逃生路径可能被堵塞，应该也有可能成功逃生。

如果爆炸后导致大火，那么大火可能是对逃生的主要挑战，但由于结构影响产生的堵塞可能会使逃生阶段变得更加困难。

其他意外事故，如碰撞和环境载荷过度，可采用预防性质的逃生和撤离，或在实施撤离时意外事故的影响就已经消失了。在碰撞之后有可能会导致平台倒坍。然后，可能会决定撤离平台，并且有效逃生路径(特别是受伤人员的运送路径)仍然可用至关重要。

就某种意义而言结构事件有点特殊，顶边部分未受损或因整体结构倒坍而严重受损。因此，逃生通常不会受到顶边设备损坏的影响，而会受到严重结构碰撞导致对下部建筑产生的影响。此类现象造成全部逃生路径同时受损，或无任何逃生路径受损的情况。因此，如果结构破坏不是很危急，应该有可能逃生至集合区域。因而，受伤人数或死亡数将取决于如何进行紧急撤离。因此下面的讨论只限于火灾和爆炸事故后的逃生。逃生分析通常以下列方式进行：

- 根据不同的意外事故场景，定性工程评价从每层甲板的每个区域的逃生概率；
- 提供汇总表以显示存在的逃生问题；
- 根据定性分析，对死亡事故风险研究制定定量输入信息。

另一方法是应用定量逃生时间研究，即模拟从不同区域至临时避难所人员流动的时间。该方法并没有说明人员可能会暴露于不能接受的条件之下，但其确实证明了可能存在的瓶颈。

建议在设计新的海上设施时至少应遵循包含先定性评价后定量研究的序列。因此，所有下列主题将分别讨论如下：

- 逃生时间分析；
- 损害分析；
- 逃生死亡事故分析。

7.4.2 逃生时间分析 Escape Time Analysis

“逃生时间”是指自警报响起时至所有人员都抵达集合点(另见下文“集合时间”)止的整个期间。现有能够相当详细地模拟在逃生情况下人员流动的有效软件(Soma,1995)。该款软件可能适用于配员水平非常高的海上设施或船舶,但可能特别不适用于少于50人的海上设施,而现代海上设施通常就是这种状况。对于近似计算可使用下列方法:

- 通常认为在走廊行走的速度约1 m/s;
- 对于常规高度的楼梯,沿着楼梯的正常步行速度计算为0.7 m/s。

可能有必要区别“逃生时间”与“集合时间”之间差异。集合时间包含逃生时间,以及需要确定任何失踪人员,通常称为“确认在船人员综述(POB)”的时间。该时间通常可能约为15min,但即使是演习,有时可能会需要更多时间调查为何有些人失踪了。在下文中所使用的平均集合时间为20min。

对于大型综合海上设施,通常认为搜索和救援受伤人员可能需要长达30min才能完成。应意识到该时间从未得到过确认及精确计算,而且将永远保持假定值。这就是为何非常精致和“精确”计算人员撤回庇护区/临时避难所需花时间的数值是很有限的另一原因。

自动运动登记装置已安装在有些平台上,特别安装在可能有人员在桥接平台之间走动之处。这些系统应该能提供有关人员最后登记之处的信息,以避免在集合点被“在船人员总数(POB)计数”遗漏。就减少搜索时间而言,由于采取该系统时能更好界定搜索区域,也就可能会赢得时间。

如未应用自动运动登记装置,完成搜索和救援的最短期限约为50min,而采用此类设备时,所需时间约为35～40min。这些数值确定了逃生路径所需要的不受损害的最短时间。这些也是下文所述损害分析的输入信息。

7.4.3 损害分析 Impairment Analysis

逃生路径损害概率应考虑的这类情况,包括热量、爆炸载荷或低能见度,由

于烟雾阻止了人员从原来事故地点抵达庇护区。如果大风从生产/井口区域吹向集合点，逃生路径的烟雾损害可能是个问题。如果泄油在海面上被点燃，问题将特别严重。那时大量烟雾可能会环绕着平台，导致使用外部逃生方法成了问题，并且还会妨碍撤离本身。

有关热载荷的计算，损害概率会考虑风向。庇护区发生损害时，人们不能待在庇护区内很久以实施安全和全面撤离。

常见的做法是每个主要区域应有两个独立逃生路线，当其中一条路线被堵时就不是很危险。损害概率计算时必须考虑该情况。

损害建模方法可按照逃生期间死亡事故风险量化的相同原理实施（见第7.4.4节），除了将死亡事故概率更换成损害概率之外。

7.4.3.1 定性场景分析 Qualitative Scenario Analysis

定性分析从任何区域至集合区域的可能逃生路线。建议使用基于表格形式的评价方法，共提出了3种表格形式：甲板接甲板的运动表、汇总表以及定量分析输入表。该评价旨在：

- 确定平台上任何区域至少有一条安全逃生路线；
- 确定该逃生路线有一条有效替代路线；
- 确定逃生至安全区域的路线尽可能最短；
- 指出能改进的目前布置细节，以满足上述目标。

安全逃生路线是指该路线在事件发生后能有充足时间让所有人员逃生至集合区域的可通行路线。要求有效替代（次要）路线至多是部分暴露，虽然可以容忍完全暴露，假如该路线很短的话。

在定性分析中应用表格描述了从某一甲板至集合区域的可能逃生路线。表7.4所示为例表。

在编制逃生路线和死亡事故分析文档时，认为必须使用某种类型格式。这可避免任务完成时所获得的分析只是分析师基于大量主观和不可追溯的评估。

表 7.4　逃生路径定性评估例表

从模块逃生	确认主要路线	距离	防护	确认次要路线	距离	防护	替代应急集合	
							确认	防护
PXX. Y	露天甲板（WD）东侧或西侧走道	短距	暴露	东侧和西侧楼梯向下通往夹层甲板 夹层甲板东侧和西侧走道	长距	部分暴露	无相关性	—
PZZ. W	露天甲板东侧或西侧走道	短距	暴露	东侧和西侧楼梯向下通往夹层甲板 夹层甲板东侧和西侧走道	长距	部分暴露	无相关性	—

表中使用了一些词语和代码字，具体如下：

- 主要路线：　表中所描述的特定区域人员之首选。主要路线最好是不暴露于火灾荷载，即使至集合区域的跑动距离大于最短路径（见下文）。
- 次要路线：　当“主要路线”不可用时的最佳替代路线。“次要路线”也应提供较高成功概率。
- 替代应急集合：　集合点之外的撤离应急集合区域。

集合点定义为在撤离或放弃海上设施之前人员可聚集的具有相对安全环境之处。如果在平台两侧有相同的逃生路径，则应算作为两种主要替代逃生路径（而不是作为主要和次要路径），事实上由于火源和风向的因素，热载荷可能会轻易地阻止人员从一侧逃生。

平台规模和设计功能需考虑跑动距离。下列词语用于描述逃生距离的特性：

- 短距：如果甲板直接通达集合区域，最短路径可考虑为甲板两侧的走道；
- 中距：若为了避免火灾荷载，必须往下或往上一层甲板跑动，该距离表示为中距；
- 长距：若为了避免大火，必须往下或往上两层或两层以上甲板跑动，该距离表示为长距。

为避免火灾产生的后果，中距甚至长距路线有时可能是首选（主要路线）。因此，在逃生过程中对火灾荷载进行防护彰显重要。下列分类法用于逃生路径防护的分类：

- 保护：
  暴露　　　逃生路径全长缺乏甲板或舱壁的屏障；
  部分暴露　逃生路径部分长度缺乏防护；
  良好　　　逃生路径全长都有屏障。

每个模块和每个危险类别的个体场景表将汇总至总表内。表 7.5 所示为例表。该表使用的缩略词与个体模块所使用的相同。

表 7.5　逃生路线定性评估汇总表

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">逃生
离开</td><td>逃生距离</td><td colspan="8">意外事故发生位置</td></tr>
<tr><td>P=主要</td><td>P1</td><td>P2</td><td>P3</td><td>P4</td><td>P5</td><td colspan="2">P6</td><td>P7</td></tr>
<tr><td>S=次要</td><td>爆炸/火灾</td><td>爆炸/火灾</td><td>爆炸/火灾</td><td>爆炸/火灾</td><td>爆炸/火灾</td><td>火灾</td><td>爆炸和火灾</td><td>爆炸/火灾</td></tr>
<tr><td rowspan="4">P7</td><td rowspan="2">西</td><td>P:中距/长距</td><td>PE</td><td>NE</td><td>NE</td><td>NE</td><td>NE</td><td>NE/PE</td><td>NE/PE</td><td>—</td></tr>
<tr><td>S:长距</td><td>NE</td><td>NE</td><td>NE</td><td>NE</td><td>E</td><td>PE/NE</td><td>PE/NE</td><td>—</td></tr>
<tr><td rowspan="2">东</td><td>P:中距/长距</td><td>NE</td><td>NE</td><td>NE</td><td>NE</td><td>E</td><td>PE/NE</td><td>PE/NE</td><td>—</td></tr>
<tr><td>S:长距</td><td>PE</td><td>NE</td><td>NE</td><td>NE</td><td>NE</td><td>NE/PE</td><td>NE/PE</td><td>—</td></tr>
<tr><td colspan="11">缩略词：NE=未暴露；PE=部分暴露；E=暴露；PD=部分损害；D=损害</td></tr>
</table>

7.4.3.2　定量分析的输入 Input to Quantitative Analysis

定性评价提供了定量逃生研究的输入信息。该输入信息由下列分类组成：

- 集合区域的人员数量（撤离研究的输入信息）；
- 次要撤离集合点的人员数量（撤离研究的输入信息）；
- 被困于其他地区的人员数量（死亡事故风险研究的输入信息）。

格式举例参见表 7.6。

表 7.6　撤离分析输入信息汇总表

意外场景(主要类别)	集合区域人员数量	次要撤离集合点人员数量
井喷和井口区域	80	15
井喷和钻台区域	90	5

7.4.4　逃生死亡事故分析 Escape Fatality Analysis

逃生死亡事故分析通常应用于事件树内的终端事件。所提议的建模基础与立即死亡事故的物理建模相同(见第 7.1.3.1 节)。

本概述认为在甲板上只有一条逃生路线 ER(x,y),并没有垂直运动,在事件树中有一个终端事件 j。在分支 k 内的死亡事故先可表示如下:

$$fat_{\mathrm{ER,j}} = P_{\mathrm{ER}} fracfat_{\mathrm{ER,j}} A^{+}(t) \tag{7.7}$$

式中:

$fat_{\mathrm{ER,j}}$——终点事件 j 的逃生期间的死亡数;

P_{ER}——需使用逃生路径的人数 ER;

$fracfat_{\mathrm{ER,j}}$——由于热载荷,终点事件 j 的 ER 死亡事故百分率;

$A^{+}(t)$——调整系数(与时间相关),涵盖其他系素,逃生完成后起火发生概率。

例如,该概率值可确定如下:

$$fat_{\mathrm{ER,j}} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } \dot{q}(x,y) \geqslant 50\mathrm{kW/m^2} \\ \text{线性增加 } 0 \sim 1, & \text{对于区域 } \dot{q}(x,y) \geqslant 20\mathrm{kW/m^2} \\ 0, & \text{如果 } \dot{q}(x,y) \leqslant 20\mathrm{kW/m^2} \end{cases} \tag{7.8}$$

式中:

$q(x,y)$——$ER(x,\ y)$处的热载荷;

$R1$——无幸存者的热载荷最低极限；
$R2$——全体生存的热载荷最高极限；
X,Y——逃生路线坐标。

热载荷 $R1$ 和 $R2$ 的确定是基于人体耐受性极限，类似于第 6.9.5 节所述及内容。$R1$ 和 $R2$ 的标准热载荷可等同于立即死亡事故的热载荷：50kW/m^2 和 20kW/m^2。

7.5 撤离风险分析 Analysis of Evacuation Risk

7.5.1 撤离手段概述 Overview of Evacuation Means

在撤离风险分析之前需要对撤离方案进行实际评价。本章首先简要介绍在应急情况和预防性撤离时直升机的使用。在时间和条件允许的情况下，撤离时通常会首选直升机。下文的论述说明了对实际海上设施进行的考虑和评估。在应急情况下的直升机援助有两个可选项：

- 位于设备现场的直升机；
- 来自陆上基地的直升机。

陆上基地的直升机也有两个可选来源：

- 搜救(SAR)直升机；
- 运送人员的普通直升机。

若干年前，在北海几乎无直升机长期停靠在离岸设备现场。没有一架是设

备齐全的搜救直升机，仅有几架具有部分搜救设备。搜救功能是否必须完全取决于事故场景。

目前挪威地区的情况有所改变。现有好几架设备齐全的搜救直升机停靠在离岸设备现场。这都归功于设备现场与作业人员之间涉及应急预案的广泛合作。总体情况是，守备船数量一直在减少，而搜救直升机一直在增加。在通常情况下，位于同一区域内的 5～10 个平台共享一架搜救直升机，该直升机长期停靠在其中一个平台现场。相同海上设施也可共享一艘或两艘守备船。

挪威大陆架(Vinnem and Vinnem，1998)的风险等级分析考虑了两个假设的现场位置，以及直升机对这两个现场的可能响应时间。表 7.7 概括了涉及搜救服务工作所显示的最小响应时间和距离。

所考虑的两起案例为位于下列位置的浮式生产储卸装置设施(工作人员共 50 人)：

- 挪威北海 30/8 区块，欧瑟波格(Oseberg)综合设施西南 15km；
- 挪威海 6 507/6 区块，海德润(Heidrun)东北 30km、诺纳(Norne)西南 35km。

陆上搜救海王直升机可搭载 18 名乘客，其巡航速度约 190km/h。如果运送担架，则可搭载携带着受伤人员的 7 个担架。在黑夜和低能见度的时候，设备齐全的海王直升机还能执行搜援行动。

表 7.7　搜救服务以及两个现场位置响应距离和时间

“搜救”源点	30/8 区块	6 507/6 区块
陆上搜救服务的距离和响应时间		
● 索拉(Sola)	185km，70min	570km，185min
● 奥兰(Ørland)	400km，135min	180km，70min
● 博德(Bodø)	735km，175min	265km，95min
海上搜救直升机的距离和响应时间		
● 国家湾(Statfjord)	85km，40min	435km，145min
● 埃科菲斯克(Ekofisk)	330km，115min	不可适用

海上直升机通常较小，但可能有更高的巡航速度。现在海上直升机大部分都有搜救功能。其他直升机在事故发生时可能在该区域，但显然不可能依赖于

该直升机。

如果条件允许,所期望的撤离手段通常为直升机。然而,直升机需等到事故发生之后过一段时间才能抵达,立即可用的撤离手段是使用那些安装在海上设施上的工具。然而,直升机或救生艇的使用,不仅仅是可用性问题,还将取决于:

- 海上设施是否起火;
- 天气状况;
- 直升机坪承受的风险;
- 容量;
- 响应时间。

在立管起火不影响直升机坪(如气体或烟雾已吹离)以及不受结构冲击和失效影响的情况下,应当可以使用直升机。在下列情况下,救生艇被认为是最安全的撤离工具:

- 生产火灾;
- 井喷未在海面上燃烧;
- 在起火之前的井喷。

集合区域应防止海上大火产生的热载荷,并应保持与救生艇和直升机撤离集合点的合理距离。在平台另一端远离主集合点的任何集合区域和撤离设备应该只能提供给那些无法抵达主集合区域的人员使用。

7.5.1.1 实施撤离的经验 Experience from Performed Evacuations

表 7.8 描述了在挪威地区以往紧急撤离的详细信息,但不包括那些跨过船桥就是独立生活平台或浮式住宿船的撤离情况。预防性撤离也排除在外。

表 7.8 在挪威北海的平台撤离汇总表

海上设施	年份	事故类型	伤亡总数	涉及撤离的受伤	海上人数
埃科菲斯克·阿尔法	1975	立管起火泄漏	3 人死亡(在撤离时)	3 人在破损密封舱内受伤	无人逃生至海上

（续表）

海上设施	年份	事故类型	伤亡总数	涉及撤离的受伤	海上人数
埃科菲斯克 · 布拉沃	1977	井喷未起火	无人死亡	无人在密封舱内受伤	无人逃生至海上
亚历山大 · 基尔兰德	1980	倾覆	平台和海上无数人死亡（共 123 人死亡）	在破损救生艇内 20 多人受伤	约 15 人逃生至海上
西部前卫	1985	浅层气起火井喷	钻台处 1 人死亡	在 2 艘救生艇内无人受伤	无人逃生至海上
西伽马	1991	拖航时倾覆	无人死亡	无救生艇可用	约 35 人逃生至海上

可观察到自 20 世纪 70 年代末起仅有两个固定平台使用了密封舱或救生艇紧急撤离。从那以后，还有 3 次从移动式钻井平台撤离。在亚历山大 · 基尔兰德（A. L. Kielland）和西伽玛（West Gamma）倾覆事故中，只能从海上救起一些人，因为这两次意外事故都是在恶劣气候条件下迅速发生的。在晴好天气条件下发生的 3 起案例都是使用了传统救生艇而成功撤离。

同样值得注意的是，虽然许多海上设施配置了抛落式救生艇几乎有 20 年时间，但实际救生艇撤离并没有发生涉及抛落式救生艇的案例。船舶上也配置了抛落式救生艇，但还没有运用在船舶上的已知案例。

7.5.1.2　救生艇撤离 Lifeboat Evacuation

某些事件会妨碍一些人员不能抵达主要庇护区，这些人可能会使用配置在次要救生艇站的救生艇撤离。一般认为该组人员逃生和下水时间将小于或等于主要庇护区的人员。

另一组人员可能会抵达主要庇护区，但由于救生艇下水失败，而无法在该处使用救生艇撤离。主要救生艇站通常至少备有一艘额外救生艇，以防此类不测事件。

垂直抛落式救生艇下水公认为是相当迅速的，估计在 5min 左右。据推测，假设救生艇下水失败，大约需要花 10min 时间登上另一艘救生艇和放其下水。常规救生艇下水时间认为是抛落式救生艇下水时间的两倍左右。

基于上述因素，个别群体逃生和撤离的全部时间为 25～60min，并不包括协助伤者或试图处理意外事故所需时间。一般认为需要相应留一些时间处理这

些事务。如果增加 30min 用于落实此类状态，那么庇护区、撤离系统、控制室和平台主体结构必须保持完好无损长达 90min 左右。不过，大部分人员在该时间之前就早已撤离。

导致救生艇不够使用的多艘抛落式救生艇下水失败的概率是可以忽略的。常规救生艇下水和/或放行失败的概率相当大，而且非常依赖于天气情况和海况。

7.5.1.3 直升机撤离 Helicopter Evacuation

表 7.9 描述了使用直升机撤离拥有 115 人的整个平台组合所需要的计算时间。该案例构思是应用于特定位置和考虑具体陆上搜救直升机站。实际位置与案例不相关，并且整个组合撤离所需时间是说明性的。

可能会有多架直升机可用于执行撤离行动。两架或两架以上直升机执行撤离所需时间将会明显缩短。然而，由于考虑空中空间因素，3 架以上直升机要同时安全操作的可能性不大。

有些人可能无法抵达主要集合区域，并且不能由直升机撤离，然而应该能够在次要庇护区使用救生艇撤离。

由于事态发展或一些其他原因，另一组人员或许不能抵达主要集合区域，不能由直升机撤离。他们极有可能使用主要救生艇。然而，本论述不考虑该撤离场景。

表 7.9　直升机撤离时间

行　动	持续时间/min		
	#1 机场	#2 机场	相邻平台
	海王直升机		贝尔-412 直升机
自请求直升机至机组人员行动的时间	60	60	5
撤离所有人员所需时间（假设一架直升机穿梭于相邻平台）	（7 次飞行）	（7 次飞行）	（9 次飞行）
	195	195	255
撤离所需总时间	315	310	275

还有一种可能性就是有些人不能抵达任何规定的集合区域。如果逃生路径受到热量、烟雾或障碍物的影响，就有可能会发生上述情况。如果可能的话，

这些人员将不得不使用其他方法撤离。应该强调的是考虑救生艇撤离时也同样存在该问题。

7.5.1.4 所需完整无缺时间的概述 Summary of Required Intact Times

基于前面章节的保守值，表 7.10 概述了主要安全功能需要保持完好无损的时间。

该表中的时间是指人员必须能安全地停留在设备上完成安全撤离的一段时间。该段时间等同于庇护区、控制室和主要/船体结构安全功能完好无损所需时间。

当时间至关紧要时救生艇仍将是首选撤离工具，哪怕是直升机就停靠在现场。因而需设立选择救生艇撤离的最短时限。下列是安全性评估使用的完好无损所需最短时限：

表 7.10　撤离所需时间汇总表

撤离方式	撤离所需时间/min				
	逃生路径	主要庇护区	撤离系统	控制室	主要/船体结构
直升机(＃1 机场)	50	315	315	315	315
直升机(＃2 机场)	50	310	310	310	310
直升机(相邻现场)	50	275	275	275	275
救生艇	50	90	90	90	90

- 逃生路径：　　50min；
- 庇护区：　　1h30min；
- 撤离系统：　　1h30min；
- 控制室：　　1h30min；
- 平台主体结构：　　1h30min。

对逃生路径、庇护区、撤离系统和主体结构的要求是显而易见的。控制室必须尽可能长时间的运行，以提供工作人员充足信息，从而能够安全撤离。

据观察，在几起意外事故中，撤离时间已超过演习期间所观察到的时间。可能该情况的主要原因是决策过程中的延误。即使在已到了很危急的撤离情

况下，撤离开始启动时已经浪费了相当多时间。究其原因可能是倾向于花太多时间去尝试处理意外事故。

因此，就集合和撤离时间而言，决策似乎是除了逃生路径布局之外的另一个重要因素。

7.5.2 损害分析 Impairment Analysis

如上文所述，涉及庇护区、撤离系统和平台主体结构完好无损的所需时间均取决于安全撤离的可能性。在许多意外事故发生时会得到一些预警，因此在情况危急之前所有非必要人员就已经可以撤离。井喷几乎总是会有预警，于是就可以启动预防性撤离。这可能会减少与燃烧井喷相关的风险。

如果发生整体倒塌事故，结构产生的热载荷也会损害主体结构并造成庇护区的损害。因此，安全功能的损害是安全逃生和平台撤离所需完整无缺的一段时间功能。

损害分析在很大程度上变为实施涉及下列各项的概率生存时间：

- 庇护区（临时避难所）；
- 指挥/控制中心；
- 主体结构。

庇护区载荷大小（不考虑直接处理的结构失效）往往涉及集合区域的烟雾侵入。因此，对于烟雾侵入的研究必须以概率方式进行，从而确保所需概率。由于烟雾侵入而导致指挥和控制中心失效情况通常是用同样的方式处理。

涉及所讨论的事故载荷，主体结构发生失效的概率可通过使用结构分析工具进行评估。

7.5.3 撤离死亡事故分析 Evacuation Fatality Analysis

对于撤离分析可使用几个模型。此处概述的模型是基于事件树方法。撤离分析将包括以下任务：

1）根据不同环境条件和场景，通过故障树分析对可选撤离方法的失效概率进行评估。

2）评估每一撤离方法的概念。

3）通过事件树分析对撤离效率和成就进行总体分析。

4）编制救援死亡事故分析的输入。

撤离死亡事故分析的另一选择是使用统计仿真技术，如蒙特-卡罗（Monte Carlo）分析。采用该方法的所有因素都由统计分布进行描述，并且不同结果的概率取决于对许多随机选定条件的考虑。该仿真将只取代上文列出的第 3 条，而其他几条将如同所述。撤离仿真通常会整合至救援阶段的整体仿真。

7.5.3.1　撤离方法的失效概率 Failure Probabilities for Evacuation Means

在不同环境条件和场景下，可选撤离方法的失效概率通常是通过故障树分析进行评估。该评估将取决于撤离系统的可选类型。

该阶段的结果可以表达所有撤离方法，各隔离场景如表 7.11 所示。对个体救生艇概念的评估将根据故障树分析的结果，并特别考虑以下各方面：

- 受挫的风险（当抛落式救生艇入水角度不佳，这样宁可掷回而不是潜入海浪）；
- 海况和气候操作限制；
- 依赖于外部船舶或系统；
- 意外释放或操作风险；
- 对于平台组合的总撤离时间。

表 7.11　撤离方法的失效概率汇总表

失效概率							
撤离方法	在良好环境条件下撤离						在恶劣环境条件下撤离
	平台燃烧井喷	海平面燃烧井喷	立管火灾	生产/公用设施火灾	碰撞	严重结构损坏	
主要	0.17	0.29	0.33	0.08	0.05	0.04	0.43
次要	0.29	0.37	0.30	0.21	0.09	0.07	0.53

7.5.3.2 撤离研究的结果 Results from Evacuation Study

撤离方法的可用性可通过死亡事故百分率进行测定。通常认为这是表达撤离方法可操作性的最好方式。该可操作性可以按下列方程式进行量化计算：

$$A_{e,i} = 1 - \frac{N_{evacfail,i}}{N_{escape,i}} \tag{7.9}$$

式中：

$A_{e,i}$——替代方案“i”的可用性；

$N_{evacfail,i}$——使用全部可用方法(替代“i”)都未能撤离的人员数；

$N_{escape,i}$——成功逃生至临时避难所或次要撤离点人员数，替代方案“i”(最大为全部的在船人员总数)。

除了如上文所述的整体可操作性之外，还应该表达在不同意外事故和环境条件下的结果分布。该信息对于应急规划颇有价值。

7.5.3.3 输入至救援研究 Input to Rescue Study

如果使用仿真来确定正在启用的不同撤离系统的结果，该模型将给予定量输入数据至表 7.12 说明的救援研究中。

表 7.12 撤离死亡事故研究汇总表

意外事故场景	不同后果群体的预期人员数						
	成功撤离	撤离船舶破损	启动失效	留在平台上	幸存者在海上漂浮	没有从平台撤离	海上漂浮，人员伤亡
井喷	120	45	0	5	5	0	2
燃烧井喷	90	48	0	8	12	8	11
立管泄漏	60	78	0	4	15	12	8

7.6　结合救援作业的风险分析 Analysis of Risk Associated with Rescue Operations

救援分析是整个逃生、撤离和救援(EER)分析的最后步骤。救援分析不仅是依赖海上设施的本身资源，事实上大部分救援资源都来自外部。守备船在救援/搭救人员方面发挥了重要作用，但守备船充当该角色的记录不是很令人感动的。在下列意外事故中，守备船不能够救援一个人员：

- 亚历山大·基尔兰德(A. L. Kielland)倾覆事故(1980 年于挪威北海)；
- 海洋突击者(Ocean Ranger)倾覆事故(1984 年于加拿大北大西洋)；
- 西伽玛(West Gamma)倾覆/下沉事故(1990 年与北海，挪威守备船/拖轮施救)。

然而，应该补充的是在上述所有案例中的天气状况都相当恶劣。所提及的首个案例中人员由其他船舶救援，在最后案例中所有人都由另一艘船舶营救了。海洋突击者(Ocean Ranger)案例中没有人获救，因为守备船未能救援在救生艇上的人员。然而，有几起案例中守备船能够救援在救生艇上所有人。

表 7.13 和表 7.14 给出了在北海救助作业的经验数据，分别为从平台意外事故救援和从海上设施附近直升机意外事故救援(Vinnem，1999)。

图 7.8 给出了从上述概括的实际意外事故中获得的经验数据汇总(Vinnem，1999)，其中说明了两者获救人数和救援人员所需时间。考虑了 3 种环境条件状态："良好"、"一般"和"恶劣"。同时还提出了假设平均分布的良好天气条件。

表 7.13　在北海直升机意外事故的救援经验一览表

日期	意外事故类型	海上设施	位置	涉及人数	救援方式	救援时间(分钟)	气候条件
1988 年 7 月 15 日	直升机受控水上迫降	挪威北海	离海岸 70mile	18 人	搜救直升机	迫降后约 60min	3～4m 波高

（续表）

日期	意外事故类型	海上设施	位置	涉及人数	救援方式	救援时间（分钟）	气候条件
1992 年 3 月 14 日	直升机坠落海中	Corm A 与浮式住宿船之间往返飞行		12 位幸存者，5 人死于残骸内，6 人因伤死于海上	人员落水，搜救直升机	20min 响应时间，另加 70min 营救 6 位幸存者	27kn，15m 波高
1990 年 7 月 25 日	直升机坠毁在甲板上和坠落海中	布伦特·史帕尔		7 位幸存者	人员落水	短时	风平浪静
1996 年 1 月 18 日	直升机受控水上迫降	飞往乌拉/格达	离索拉 41nm	18 人	搜救直升机	迫降后 60min	风平浪静

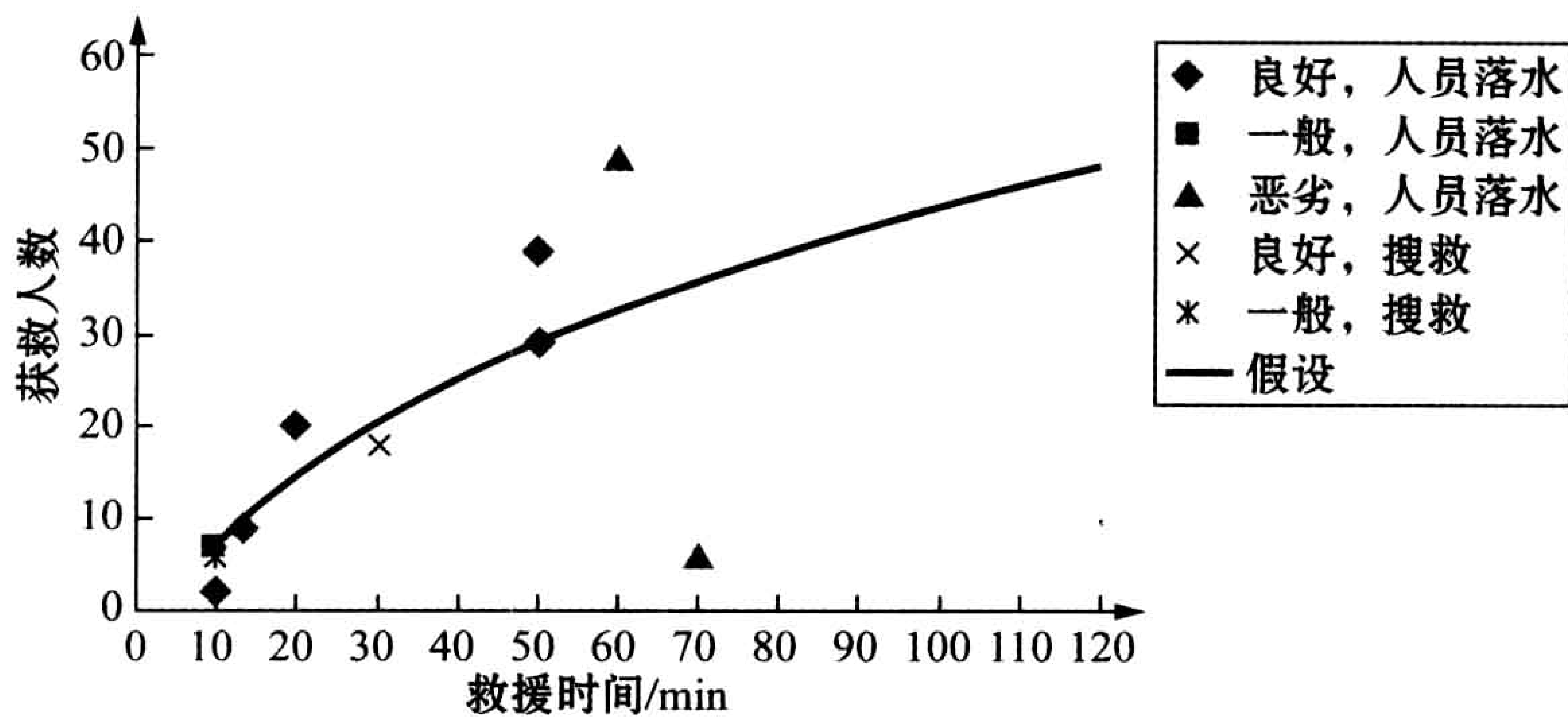


图 7.8　人员落水船舶和搜救直升机所需救援人数与所需救援时间之间的关系

7.6.1　救援时间分析
Rescue Time Analysis

挪威大陆架的风险等级分析（Vinnem and Vinnem，1998）考虑了两个假设现场位置直升机可能响应时间。图 7.9 引用该研究并显示了位于北海北部和挪威海（“豪腾班肯”）平台的时变搭救成功概率。救援响应时间取决于下列条件和能力，详情如下：

- 1 人在海中，30/8 区块和 6507/6 区块（见第 6.5.1 节）；
- 5 人在海中，30/8 区块和 6507/6 区块；

- 15 人在海中，30/8 区块和 6507/6 区块；
- 2 人在平台上，30/8 区块和 6507/6 区块。

表 7.14　在北海除直升机意外事故之外的救援经验一览表

日期	意外事故类型	海上设施	位置	涉及人数	救援方式	救援时间/min	气候条件
1975 年 11 月 1 日	立管爆裂、爆炸和火灾	埃科菲斯克·阿尔法			66 人由工作艇转送		5m/s，0.5m 波高
1980 年 3 月 27 日	倾覆	亚历山大·基尔兰德		89 位幸存者	59 人乘坐 2 艘救生艇，47 人乘坐 1 艘救生艇由搜救直升机施救	近数小时	
1980 年 3 月 27 日	倾覆	亚历山大·基尔兰德		89 位幸存者	12 人乘坐 2 艘救生艇由供应船施救	近数小时	狂风猛吹
					16 人乘坐救生筏，9 人由搜救直升机施救，7 人由供应船施救	未知	
					7 人由供应船从海上救起	>30	
					7 人由 Edda 空中吊篮施救	未知	
1982 年 2 月 15 日	倾覆	海洋击者	远离纽芬兰岛	84 人	31 人乘坐 1 艘救生艇与守备船相撞，全部淹死，未见残骸		
1986 年 10 月 6 日	燃烧浅层气井喷	海洋前卫	豪腾班肯	79 位幸存者：77 人乘坐 2 艘救生艇由守备船施救，2 人因落水从海上获救，1 人死于爆炸	人员落水，守备船	>30 营救 2 位幸存者，1.5～2h 营救 77 位乘坐救生艇者	低风速，2～3m 波高
1988 年 7 月 6 日	气体爆炸和事态加剧至火灾	帕玻尔·阿尔法	北海	62 位幸存者	人员落水，守备船	22 人用时 20，39 人用时 50，63 人用时 120	
1988 年 9 月 22 日	井喷导致气体爆炸和火灾	海洋奥德赛	福尔玛地区	66 位幸存者：8 人从海上，58 人从 2 艘救生艇	人员落水，守备船	未知	8m/s 风力

图 7.9 使用比较两处地点的方式列出了这些类别。涉及完成所有场景的搭救任务最大所需时间，30/8 区块(50min)和 6507/6 区块(80min)两者之间的情况有明显差异。该差异可解释如下：

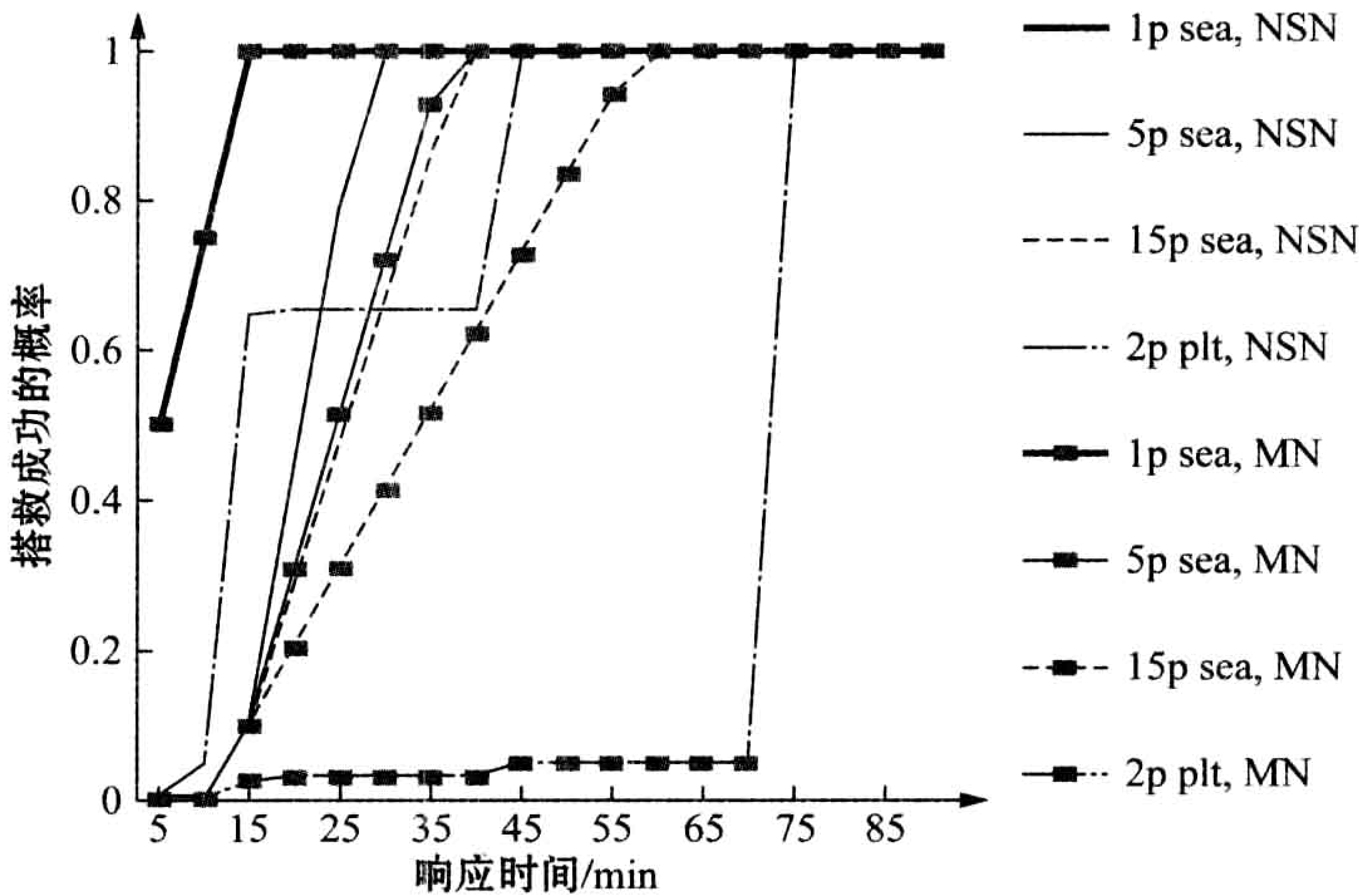


图 7.9 在北海北部(NSN)和挪威海(MN)响应时间和概率比较的案例研究

- 对于涉及人员在海上、救生艇或救生筏的场景，海上设施或守备船的快速救援艇能提供最快响应，除非天气条件不许可。
- 海况超过 HS=6m，首架搜救直升机的抵达将成为完成救援行动所需时间的决定因素。
- 对于需要尽快将平台上人员运送至岸上医疗保健中心的场景，直升机停靠在海上设施上，或邻近的海上设施上，就能保证最迅速的响应。
- 首架陆上搜救直升机的抵达能确定最大响应时间。

7.6.2 救援能力 Rescue Capacity

救援能力依赖于时间和环境条件。风况、海浪、能见度和日光条件都至关重要。有关此类救援能力的可用数据很少，下面例子应视为需要设立什么的提示，而不是只设立数据就可。

表7.15给出了涉及不同救援方式搭救能力的一些重要因素的考虑。然而，该表并不考虑搭救因在平台边上工作时不慎跌落至海中的少数人员。

此表涉及救援环境条件的影响，主要关注于白天和良好能见度条件的情况。

尽管如此，如果幸存者已撤离至海上，救援能力还是会受到相当大的限制。可能会进一步限制有效救援能力的另一因素是，如果幸存者没有设法前往一处聚集，如此的话，首先就必须花时间去搜寻幸存者。有人可能会认为，在良好天气条件下，乘坐完好救生艇的人员不需要立即救援，或至少没有需求救援的紧迫性。然而，至少需要这些条件，即使守备船只有一艘快速救援艇和一名船员，该救援能力还是相当高的。

表7.15　某些救援方式的假设救援能力

搭救模式	从救生艇搭救	从救生筏搭救	从海上搭救
直接至守备船 救援能力： 晴好天气 恶劣天气	通常不可能	在晴好天气可行，恶劣天气需用特殊设备 每小时5～6艘救生筏 每小时3～4艘救生筏	需用特殊设备（救生网或类似物） 每小时高达50 每小时高达20
直接至其他船舶	在理想天气可行	在理想天气可行	不可能，除非有快速救援艇
备用快速救援艇，1艘船，1位船员（包括转送至守备船） 救援能力： 晴好天气 恶劣天气	高达HS=6m都可行 对船员将有要求 每小时30人 每小时15人	如同救生艇 每小时30人 每小时15人	高达H_S=6m都可行，但取决于搜寻海上幸存者 对船员将有非常高的要求 每小时15人 每小时少于15人
备用快速救援艇，若有2位船员（包括转送至守备船）	如上所述，但船员变换可能不易疲劳	如同救生艇	如上所述，但船员变换可能不易疲劳
救援能力： 晴好天气 恶劣天气	每小时50人 每小时25人	每小时50人 每小时25人	每小时25人 每小时15人
备用快速救援艇，2艘船，3位船员（包括转送至守备船） 救援能力： 晴好天气 恶劣天气	如上所述，但船员变换可能不易疲劳 每小时70人 每小时35人	如同救生艇 每小时70人 每小时35人	如同救生艇 每小时35人 每小时25人

（续表）

搭救模式	从救生艇搭救	从救生筏搭救	从海上搭救
搜救直升机（假设需清空直升机时延迟 20min）	高达 H_S=8m 都可行 限制因素将为清空直升机所需时间，若满载的话	如同救生艇	
救援能力：			
晴好天气	每小时 17 人（直升机载客量）	每小时 15 人	每小时 10 人
恶劣天气	每小时 10 人	每小时 8 人	每小时 5～6 人

注：这些都是基于主观评价的假设值

应该指出的是，只有设备齐全的搜救直升机方可认为是具有潜在搭救功能的直升机，无论是基于离岸或基于岸上，然而，基于岸上的搜救直升机将需要相当多的动员时间。

在此类情况下其他直升机不被视为具有真正救援能力的直升机，即使已安装了人员绞车。只有当直升机上拥有专门配备并受过专业训练的救援人员能协助船舶、救生筏或海上幸存者时，才能被认为是能胜任救援行动的直升机。

对全部救援体系实施演习比较少见（在意外事故中系统得到实践更是少见），因此，观察 1998 年在北海实施综合演习的经验相当有趣：

- 演习前提：
  - ○ 有 55“人”（即玩偶）若在 120min 内被搭救就能幸存；
  - ○ 主要守备船与 9 名船员，一艘快速救援艇和一台“海上升降机”（协助将人员从海上提升上来的设备）；
  - ○ 次要守备船与 9 名船员，以及一艘快速救援艇。
  - ○ 10kn 大风和轻微涌浪；
- 具有能力：
  - ○ 在 65min 内将 55“人”全部救出；
  - ○ 搭救能力为人员落水船舶每“人”约 2min（包括转送至守备船时间）；
  - ○ 搜救直升机搭救能力为每“人”约 3min（不包括转送至船舶或海上设施时间）。
- 重要观察：
  - ○ 当快速救援艇和“海上升降机”同时操作时，在守备船船桥上至少需要 2 人；

○ 增强风速（15～20kn）和海况（2～4m）将削弱救援能力，对于快速救援艇最明显；

○ 当雇主充当“现场指挥”与岸上应急管理团队通信联络时，在守备船船桥上至少需要 2 人。

有关某一区域几个海上设施的应急预案方面，由于各营运商之间的合作，已可应用涉及直升机搭救能力的附加数据。

陆上搜救直升机已收集了海上救援人员的经验数据（OLF，2000）。数据显示，从救生筏上救援人员最迅速，而从救生艇或迫降直升机上救援人员较费时间，由于构造原因，在救援行动中可能会绊住救援线。已经证明，风力影响最小，然而救生艇或直升机的显著变动将使救援行动变得复杂。对于救生筏，经验数据显示的平均时间为每人约 1～2min。

两次演习数据提供了进一步说明，演习使用了停靠在平台上的搜救直升机从海上搭救出演习用假人（“玩偶”）。

在一次演习中测试了在 45～55m/s 大风的恶劣天气条件下救援 7 人的状况。图 7.10 显示了所计算的表现与演习展示的表现之间的比较，再次使用从海上搭救假人的方式。在计算中估计 50min 内能将 7 人转送至最近的海上设施。在演习中分两个阶段实施，首先将其中 5 人运送至海上设施处，接着在第二阶段再运送两人。第二阶段在 53min 内完成。

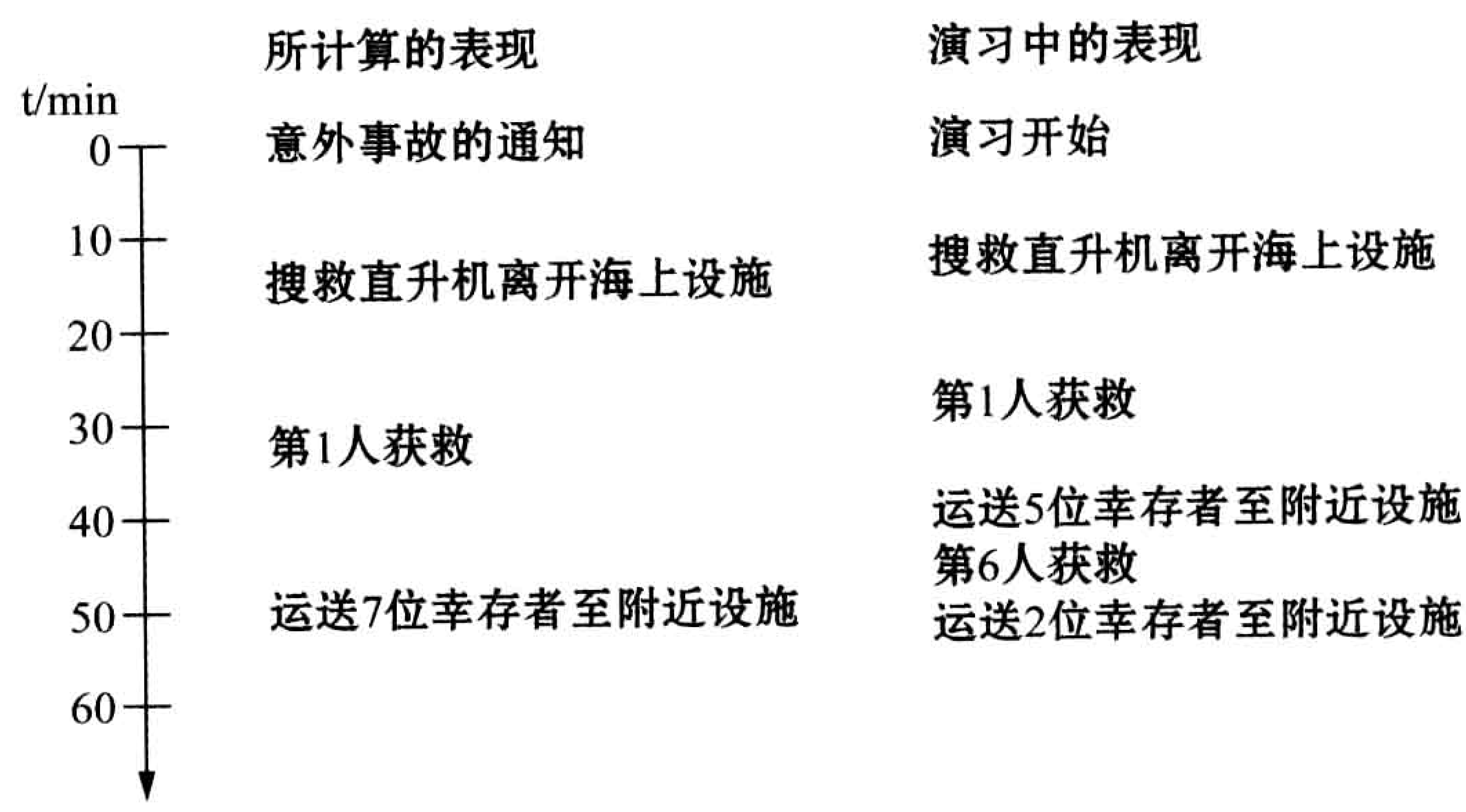


图 7.10 所计算的搜救直升机表现与恶劣天气条件下演习数据的比较

图 7.11 显示了演习中实际表现与基于经验数据计算的预期表现之间的比较。该演习是在晴朗天气条件下进行的。在演习中，共花 143min 救援 21 人，而计算预期为 137min。

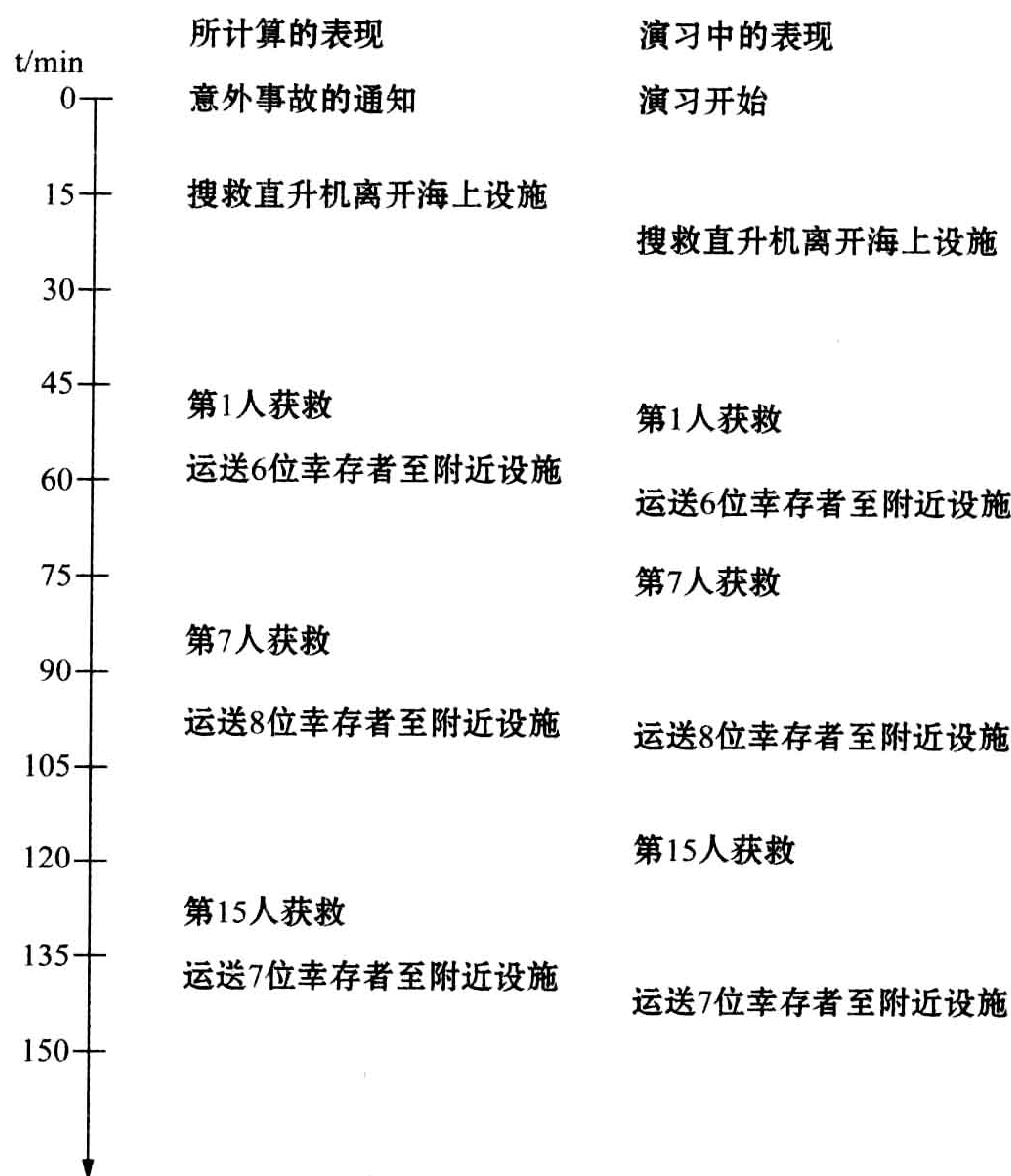


图 7.11 所计算的搜救直升机的表现与晴朗天气条件下演习数据的比较

7.6.3 救援死亡事故分析 Rescue Fatality Analysis

7.6.3.1 分析基础 Analytical Basis

救援搭救作业的成功概率依赖于许多条件和情况，并可能会导致非常相异

的结果。已证明在以往意外事故中的搭救成功概率从 0(海洋突击者)至 1.0 不等。成功概率等于 1.0 表示所有幸存者都及时获救而生存。下列几方面应纳入救援死亡事故评估中：

- 船舶或直升机抵达事故现场的时间；
- 用于搭救的有效快速救援艇；
- 如上所述的救援方式能力；
- 白天或夜晚；
- 能见度条件；
- 天气条件和海况；
- 海温；
- 海上救生服和救生衣的使用；
- 可搭救幸存者处的面积大小；
- 需救援的人员总数及其分布。

蒙特-卡罗(Monte Carlo)仿真法通常应用于救援分析。该方法的应用是基于随机统计仿真,反映假定的概率分布,以考虑各种因素、条件和情况的可能组合。基于可适用条件,时间序列以及成功/失败概率也同样可以进行仿真。

7.6.3.2　救援研究的结果 Results from Rescue Study

救援行动的可用性能通过死亡事故百分率来衡量。该可用性能以下列公式量化：

$$A_{r,i}=1-\frac{N_{\text{rescue fail}}}{N_{\text{evac}}} \tag{7.10}$$

式中：

$A_{r,i}$——替代方案 i 的救援可用性；

$N_{\text{rescue fail}}$——使用所有可用资源都未能救援的人数；

N_{evac}——成功撤离的人数。

除了如上文所述的整体可用性之外,还应该表达在不同意外事故和环境条

件下的结果分布。该信息对于应急响应规划颇有价值。

7.6.3.3 综合 Synthesis

最终综合包含将不同步骤的分析结合在一起，以产生最后结果，即整体可用性。根据公式可能会计算出的结果：

$$A_{tot} = 1 - \frac{N_{escapefail} + N_{evacfail} + N_{resuefail}}{N_{total}} \tag{7.11}$$

式中：

A_{tot}——替代方案 i 的整体可用性；

$N_{escapefail}$——未能逃生的人数；

$N_{rescuefail}$——使用所有可用资源都未能救援的人数；

N_{total}——在平台上的人员总数。

除了整体可用性和为每个阶段所表示的局部分布之外，还应该表达在不同意外事故和环境条件下的结果分布。该信息对于应急响应规划颇有价值。

7.7 人员运送过程中的死亡事故风险 Transportation Fatality Risk

自 1966 年开始离岸作业以来，在北海发生的直升机死亡事故已相当多。20 世纪 70 年代，在挪威地区平台操作过程中发生了 3 起严重事故，造成 34 人死亡。20 世纪 80 年代，在英国地区发生了具有强烈影响的近百人死亡事故。1989 年至 1998 年 10 年期间，在整个北海、大西洋和挪威海只发生 2 起死亡事故。其中一起是 1997 年发生在挪威地区的事故，另一起是 1998 年发生在荷兰地区的事故。最后一起是 2002 年发生在英国北海地区的直升机事故。

在 1986 年发生了一架“支努干”直升机意外事故，造成 45 人死亡。实际上可以认为，20 年来死亡事故频率一直有下降趋势。对北海直升机业务的某些风

险评估也反映了这一趋势。在第 3.1.5 节中已进行了详细讨论。

7.7.1 死亡事故分布 Fatality Distribution

可能需要直升机发生意外死亡事故的分布情况,以便使用频数(f-N)分布来表达对人员造成的风险。这可以从事故统计资料中产生。图 7.12 给出了每起意外事故所造成的死亡数分布。

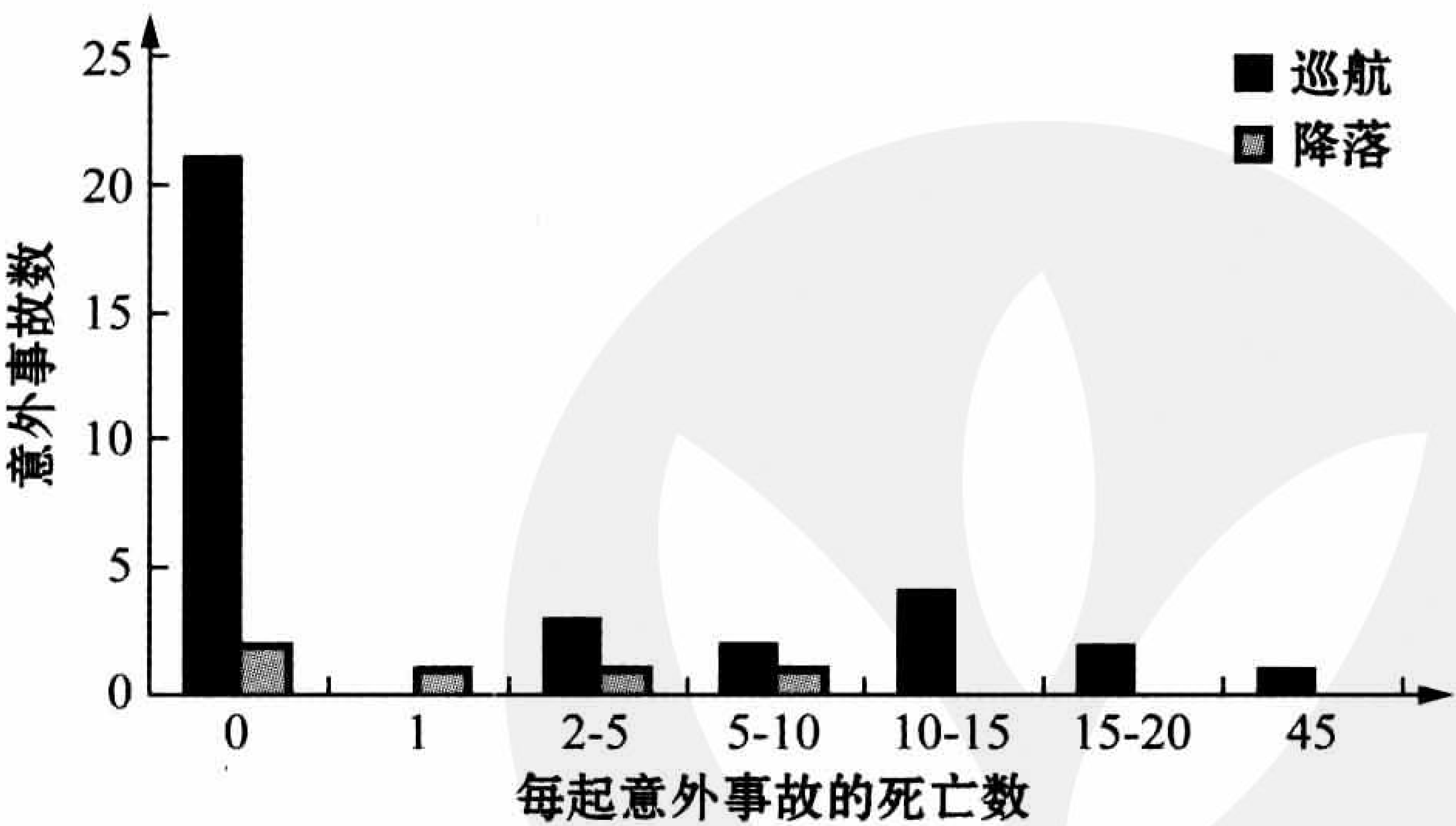


图 7.12　北海海上直升机意外事故的死亡数

在北海使用的大部分直升机一般都有 14～18 个座位,因此通常没有必要区分直升机的机型。"支努干"直升机有 45 个座位,但在 1986 年意外事故发生后,该机型直升机在北海作业中不再使用。

图 7.12 显示了直升机在巡航和降落时意外死亡人数的概览。其中省略了在直升机坪上发生的意外事故。

7.7.2 涉及岸海往返的风险比较 Comparison of Risk Associated with Shuttling

几年前的一项研究(Vinnem and Vinnem,1998)已证明了涉及经常穿梭于海岸与离岸设备之间人员风险等级的关键影响。在新设备离岸安装和调试阶段有时会发生该情况。图 7.13 显示了根据员工往返海岸频繁程度,每位离岸

员工平均每年死亡事故率的等级。下面列示了穿梭情况(包含了在图中使用的缩写):

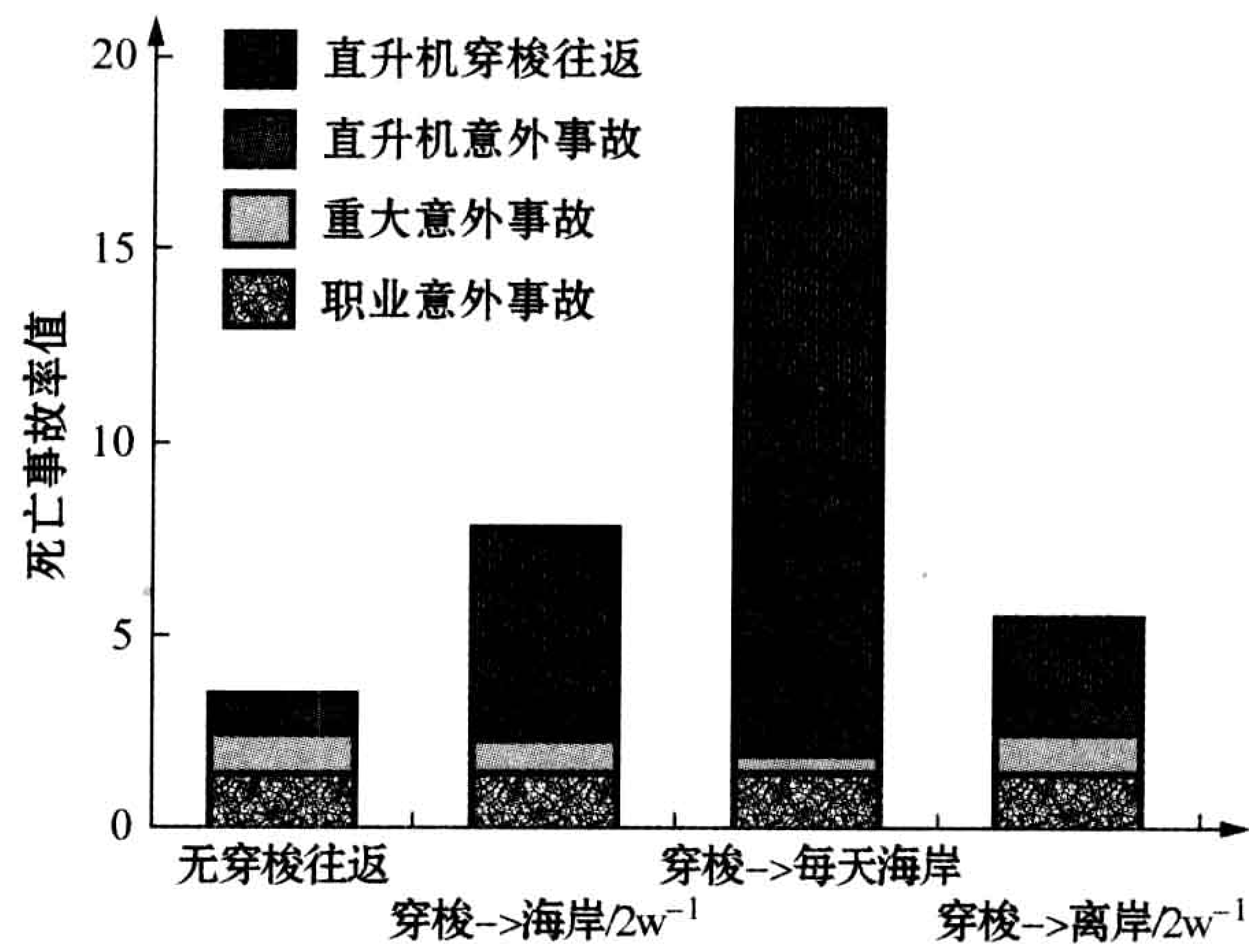


图 7.13　根据离岸工人穿梭频率程度的平均死亡事故率值的比较

- 无穿梭往返(“无穿梭”);
- 每周两次穿梭往返于海岸(“穿梭→海岸 2/w”,单程 75min);
- 每天穿梭往返于海岸(“穿梭→每天海岸”);
- 每周两次穿梭往返于邻近的海上设施(“穿梭→离岸 2/w”,单程 20min)。

所有直升机作业都包含在内,在海上设施与海岸之间开始运输至结束的整个工作周期(通常为期 2 周时间),以及在该工作周期内的任何穿梭运输。因此,从此处显示的等级可见涉及直升机的风险对离岸员工整体风险等级至关重要。

该图显示了在离岸工作周期内员工经常穿梭往返于海岸或至另一海上设施会增加相当大的风险。即使每周两次穿梭往返,增加的风险是相当大的,如果每周两次穿梭往返于海岸,那么这些离岸工人经历的总风险会增加一倍。如果每天穿梭往返,其总风险会增加近 5 倍。

应该指出的是此处提及的总风险值包含从海岸至海上设施的运输,但通常会将其排除在外,当进行概念或作业备选方案比较时。如果忽视首末航班(抵/离海岸),穿梭往返的影响将更加显著。

7.8　潜水作业的死亡事故风险 Diving Fatality Risk

潜水作业的死亡事故风险通常是基于统计分析来计算的。20 世纪 70 年代和 80 年代初发生了几起潜水员死亡事故。此后在英国和挪威地区没有再发生过死亡事故。近 20 年来，由于扩大使用遥控潜水器（ROV），潜水员的使用已经减少。然而，在第 3.1 节中给出的空气潜水与饱和潜水值能应用于风险评估目的。

7.9　停工阶段的死亡事故风险 Fatality Risk During Cessation Work

海上设施的退役通常涉及钻井和生产作业的风险。此外，在拆除海上设施时，一些涉及钻井和生产作业的风险可能会变得更加关键，例如，平台结构失效的可能性。

在设备退役作业阶段的风险管理需要结合定性和定量的方法。一般认为初步危害分析的定性技术，危险识别（HAZID）和危险与可操作性研究（HAZOP）的分析能满足于识别危险和定性评估风险。此外，还可识别和监控降低风险措施及其屏障。

由于缺乏相应作业的合适历史事故数据，对从事设备退役作业人员的风险定量更困难。此外，职业意外事故在设备退役阶段可能会比在生产经营阶段更加重大。

最近已实施了联合工业项目（JIP），旨在海上设施退役和拆除作业期间提供更好的人员风险定量基础（Haugen et al.，2004）。其重点主要是关于职业事故，基于可用数据的缺乏对于分析该类事故要比分析重大危险更成问题。表 7.16为根据研究推荐的涉及各项活动死亡事故率值汇总表。

表 7.16　设备退役适用死亡事故率值汇总表(Haugen et al., 2004)

编号	工 作 任 务	死亡事故率值
1	绳索技术	10.3
2	起重作业——平台起重机	26.8
3	起重作业——外部起重机	1.1×10^{-5}*
4	陆上起重	26.8
5	脚手架	5.5
6	设备退役操作——离岸	1.9
7	解构业务——离岸	4.1
8	预制和建造——陆上	10.4
9	拆除——陆上	12.3
10	海上作业——供应	18.1
11	海上作业——守备	3.3
12	海上作业——抛锚	37.4
13	海上作业——拖轮	13.2
14	海上作业——起重机驳船/船舶	5.5
15	海上作业——潜水支援	7.5
16	潜水——饱和度	97
17	潜水——空气	685
18	直升机	32/97**
19	管理和行政事务	0.4
20	休班时间	0.2

*表示为每部升降机的死亡事故率；
**分别表示起飞/降落和巡航值。

在该项研究中实施了一项简单的核实工作，其中基于现有意外事故记录，计算了英国和挪威设备退役项目中的总工时消费近似值，还计算了平均死亡事故率值。

在 1994～2003 年期间的相关死亡事故数被认为有 3 起。总工时数是难以计算的，但根据从 500 万至 1 500 万工时 80％的置信区间，计算了 1140 万工时的值。基于此点，在 1994～2003 年期间北海设备退役项目平均经历的死亡事

故率值为26，考虑到工时量的不确定性，变化范围从20到60不等。

历史死亡事故率（FAR）值表明通常基于行业平均统计资料计算的死亡事故率值可能会低估涉及设备退役项目的风险。可能有许多原因会导致该情况，但是在设备退役期间相关结构和装置等特别不确定性可能会导致额外风险。一些已发生的死亡事故可能就被认为是因该不确定性所导致。

第 8 章　火灾风险建模

Fire Risk Modelling

碳氢化合物泄漏及随之引发的火灾和/或爆炸是离岸勘探以及油气生产/加工过程中的主要威胁之一。发生于 1988 年帕玻尔·阿尔法油井事故灾难就是最好的“见证”。2005 年 Bombay High 钻井平台生产设施的一场火灾再次验证了泄漏所隐含的严重威胁。

8.1　概述 Overview

8.1.1　不同结果的案例 Cases with Opposite Results

通过考虑两起发生在北海起因几乎完全相同但结果有着天壤之别的事故，或许能说明该问题。两起事故发生前后相差约为 24h，而且起因都是因为天然气泄漏。两起事故的主要特征概括如下(见表 8.1)：

- 1988 年 7 月 5 日发生于布伦特·阿尔法的爆炸及其引发火灾；
- 1988 年 7 月 6 日发生于帕玻尔·阿尔法的爆炸及其事态升级引发火灾。

表 8.1　1988 年 7 月 5 日和 7 月 6 日两起事故的主要特征

	1988 年 7 月 6 日帕玻尔·阿尔法	1988 年 7 月 5 日布伦特·阿尔法
泄漏源头	盲法兰	法兰垫圈
起火源	未知的火源	可能就在喷淋系统附近
爆炸过压	大约 0.3bar	约在 0.3～0.4bar
喷淋系统	未激活，消防用水未利用	气体监测而触发(非人工)
火势发展	迅速蔓延到其他地方	燃烧持续时间仅几分钟
最终结果	全部损失	气体加工模块严重损坏
对人员的影响	167 人死亡	2 人受伤

根据表 8.1 经简化的概要可见其主要区别在于喷淋系统的激活,但还有一些更复杂原因。布伦特·阿尔法气体泄漏发生在远离生活区的最高层,然而帕玻尔·阿尔法气体泄漏则发生在邻近生活区的较低层。

8.1.2 火灾载荷的类型 Types of Fire Loads

本节概述了可能会在主要和次要结构(即支撑结构、主甲板结构及模块结构)导致产生火灾载荷的事故场景。表 8.2 所示为固定设备,表 8.3 为浮式海上设施。

表 8.2 可能会导致结构火灾载荷的 5 种火灾场景类型概述(海上生产设施)

<table>
<tr><th>事故类型</th><th>可能会导致结构性影响的条件</th><th>通常受影响的构件</th><th>关键程度</th></tr>
<tr><td>井喷</td><td>难以控制和制约,尤其是起火后。燃烧井喷通常持续时间很长,因此非常关键</td><td>通常为甲板结构受影响。如果在海平面上燃烧,也可能为支撑结构受影响</td><td>如果井口在平台上,通常最为关键</td></tr>
<tr><td rowspan="2">立管失效</td><td rowspan="2">如果是长的管线连接,释放可能会持续很长时间,并不可能隔离</td><td>如果立管在竖井内,甲板结构受影响。如无竖井,还可能在后阶段受影响</td><td rowspan="2">通常很关键,除非立管受到特别保护,或提供水下隔离</td></tr>
<tr><td>很有可能受影响,如果在甲板下面泄漏,并没有竖井。还有可能受影响,如在水下或飞溅区泄漏,从而导致在海平面上燃烧</td></tr>
<tr><td>管线失效</td><td>如果是长的管线连接,释放可能会持续很长时间,并不可能隔离。释放需要靠近构筑物,并在海平面上点燃,以免情况危急</td><td>很有可能,如果在甲板下面泄漏,并没有竖井。还很有可能,在水下或飞溅区泄漏,导致在海平面上燃烧。在后阶段甲板结构很可能受影响</td><td>通常是微不足道的影响,因为不可能起火</td></tr>
<tr><td>生产设备失效</td><td>火灾持续时间长,事态加剧至火灾失控</td><td>通常主甲板结构受影响</td><td>依赖于事态加剧的可能性</td></tr>
<tr><td>坠落物体</td><td>碳氢化合物设备破裂引起火灾</td><td>通常主甲板结构受影响</td><td>微不足道的影响</td></tr>
</table>

表8.3 可能会导致结构火灾载荷的5种火灾场景类型概述(海上浮式设施)

事故类型	可能会导致结构性影响的条件	通常受影响的构件	关键程度
井喷	干井口:难以控制和制约,尤其是起火后。燃烧井喷通常持续时间很长,因此非常关键 水下井口:从平台上难以控制和制约。起火井喷在海上燃烧,因此非常关键	通常为甲板结构受影响。如果在海平面上燃烧,也可能为海上构筑物受影响	如果井口在平台上,通常最为关键
		一般为海上构筑物受影响,但也可能为甲板结构受影响	与井口在甲板上的相比较,不太可能在海平面上燃烧。部件也可能重新定位
立管失效	如果是长的管线连接,释放可能会持续很长时间,并不可能隔离	海上构筑物受影响,因为泄漏通常发生在水下	通常很关键,除非提供海底隔离
管线失效	如果是长的管线连接,释放可能会持续很长时间,并不可能隔离。释放需要靠近构筑物,并在海平面上点燃,以免情况危急	海上构筑物受影响,因为火灾通常发生在海平面上	通常是微不足道的影响,因为不可能起火
生产设备失效	火灾持续时间长,事态加剧至火灾失控	通常为主甲板结构受影响	依赖于事态加剧的可能性
坠落物体	碳氢化合物设备破裂引起火灾	通常为主甲板结构受影响	微不足道的影响

表8.2和表8.3显示了不受控制的碳氢化合物气流是涉及结构的关键火灾载荷的主要原因。或许会注意到坠落物体可能也会起作用,但只是含碳氢化合物设备的破裂结果。在一定条件下,结构失效和碰撞冲击力可能会导致火灾,并进而影响结构。应该注意的是,可能直接导致火灾失控的失效通常要比那些依赖于事态加剧后果的失效更为关键。

8.1.3 结构性火灾影响 Structural Fire Impact

计算结构的火灾载荷和估算响应包含下列步骤:

- 碳氢化合物释放的计算;

- 火灾载荷的计算；
- 结构时间-温度分布的计算；
- 根据温度分布的结构响应计算。

对于上述每一步骤，可以使用简化方法或更全面的仿真工具。

8.1.4 人所承受的火灾和爆炸载荷 Fire and Explosion Loads on People

火灾爆炸对人员所产生的影响评估与结构影响分析相类似，虽然在某些方面是完全更为简单。

8.2 甲板火灾后果分析 Topside Fire Consequence Analysis

随后章节提供了应用于火灾后果分析的一些重要参数的简要概述，包括火灾类型及其特有的热载荷的概述。如需更详细的介绍，请参见 Lees(2004)或《消防计算手册》(SINTEF，1992)。

8.2.1 火灾的机制 Mechanisms of Fire

尽管事实上燃烧反应导致火灾，火灾进程可能是由不直接涉及燃烧的势力或因素所决定。整个进程速度可能会由不涉及燃烧反应的某一步骤所决定，或所驱动。因此，适宜将火灾区分成不同的类型：

- 在封闭空间内受通风制约的火灾(封闭或半封闭)；
- 在封闭空间内受燃料制约的火灾；
- 在开阔空间的池火灾；

- 喷射火焰；
- 流动液体的火灾；
- 火球(沸腾液体膨胀蒸气爆炸)；
- 气体火灾(预混合弥漫性)。

所有的这些场景都针对海上设施而言。可能会发生的其他类型火灾有电气设备火灾和生活区的设备火灾。在此并不讨论这些“非烃”火灾。这些火灾的火灾载荷普遍较低,但所产生的烟气也可能会产生问题。

8.2.1.1　燃烧反应 Combustion Reactions

除在燃料表面发生燃烧反应的阴燃之外,所有火灾都涉及气相燃烧。

在燃烧过程中会发生放热和吸热反应。整体反应或进程都视为涉及完全(或 100%)燃烧或燃料的氧化反应。

燃烧反应速度取决于燃烧区的温度、反应物(氧气和燃料)的浓度,以及在该区域所产生的燃烧产物。如果燃料浓度过高或过低,或温度过低,就不会发生反应。

反应速率取决于表示这些因素的参数:起火温度、易燃极限和氧指数等。其他重要特性为闪点和自燃温度。此类特性可以在许多描述不同碳氢化合物产品的文献中找到。

8.2.1.2　热传递至火焰中的物体 Heat Transfer to Object Within the Flames

火焰内部的主要热传递是通过辐射传递至火焰内部的物体。然而,在某些情况下,对流热传递等同于辐射的基值。辐射热传递可以表示如下:

$$q = \varphi\varepsilon\sigma(T_f^4 - T_o^4) \quad kW/m^2 \tag{8.1}$$

式中:

φ——配置因素；

ε——辐射系数/系统吸收因素；

σ——斯蒂芬-玻尔兹曼(Stefan Boltzmann)常数($56.7\times10^{-12}kW/m^2$ K)；

T_f——火焰温度(K)；
T_o——物体温度(K)。

如果物体完全笼罩在火焰中，假设 φ 是 1.0。如果物体周围的火焰高度等于或大于1，假设 $\varepsilon=1$。一般认为，池火灾的火焰直径必须大于3m，以造成火焰高度等于1。

火焰内温度会有差异，从火焰顶端的500℃时至火焰局部的1 600℃。1 100～1 200℃的数值经常用于计算辐射热传递，但认为该数值较保守。大规模试验的测量值表明，可能会在一定条件下产生更高温度，如在喷射火灾和液体火灾中。下列方法可用于实际预估：

- 平均火焰温度，在火焰完全吞没物体时可采用800℃；
- 根据物体周围火焰高度和密封度，式8.2中 φ 和 ε 的积可采用0.7～0.9不等。

使用数值 $\varphi\varepsilon=0.7$ 和 $T_f=800$℃所产生的 $52kW/m^2$ 辐射热传递可视作为标准平均值。

一般认为火焰的区域等同于可见火焰总高度的2/3。如果池直径大，并且火焰停滞在物体上，那么在火灾起始时该区域的对流热传递就较高。热辐射与温差的正比成四次方。另一方面，对流热传递呈线性地取决于温差。

8.2.1.3 热传递至喷射火焰中的物体 Heat Transfer to an Object in a Jet Fire

如果物体处于喷射火焰内，其热传递至该物体将会远远高于受控于自然对流火焰所笼罩的物体。这是由于很高的气体流速导致70%～90%的热传递通过对流。在喷射火焰中对流热载荷局部测量值高达 $350kW/m^2$，平均值可能为 $300kW/m^2$。

在开阔空间的池火灾热传递通常具有 $150kW/m^2$ 的最大值。喷射火焰当然要远比池火灾更受局限。在顶边结构爆炸冲击与消防工程(BFETS)程序中(SCI,1998)，整个事件的热通量至目标物一般可达 $200kW/m^2$，但在一定条件下局部最大值可能高达 $350～400kW/m^2$。该情况发生于喷射火焰，以及在半封闭空间的池火灾中。

通过计算辐射热传递($\varepsilon \approx 1$)并假设其占总量的 30%,可以估计在喷射火焰内至物体的总的热传递。

8.2.2 火球 Fire Balls

火球可能是沸腾液体膨胀蒸气爆炸(BLEVE)的结果。如果油箱破裂,在高压下的气体与凝聚相混合后即刻逃逸。气相的闪蒸使液体以烟气状存在,当起火时,燃烧呈现球状或"核弹蘑菇云"状。相关因素如下:

- 燃烧前碳氢化合物释放的馏分;
- 火球的规模大小;
- 火球的持续时间;
- 火球的辐射强度。

建议参与燃烧的馏分需为 30%。Hasegava and Sato(1977)确立了下列相关的规模大小和持续时间:

$$D_{max} = 5.28 M_f^{0.277} \tag{8.2}$$

$$\tau = 1.1 M_f^{0.0966} \tag{8.3}$$

式中:

D_{max}——火球的最大直径(m);

T——燃烧持续时间(s);

M_f——所含流体的质量(kg)。

8.2.3 气体火灾 Gas Fires

气体火灾与爆炸是相互关联的现象,但对两者进行区分却也相当重要。如果下列 3 个条件同时存在,气体火灾就会发生:

- 在易燃范围内存在天然气与空气的混合物；
- 存在标准尺寸的起火能量源；
- 在封闭空间内不包含任何火焰前锋加速因素。

火焰前锋加速因素可以是在封闭空间内或至邻近封闭空间的任何狭窄通道内的物体。如果火焰前锋加速度十分强烈，就会发生爆燃（见第 9 章）。

气体火灾发生时随之形成的火焰前锋通过混合物的传播速度为 0.5～2m/s，并且其流动呈层状。气体火灾的热量和过压载荷都相对较小。

8.2.4 火灾中的耗氧 Air Consumption in Fire

在文献中给出的下列数字为下述燃料燃烧所需的空气需要量：

- 丙烷：16kg 空气/kg 燃料；
- 汽油：16kg 空气/kg 燃料；
- 甲烷：15kg 空气/kg 燃料。

这些都是在扩散火焰中完全燃烧的理论值。喷射火焰所需空气消耗量远远高于普通扩散火焰。为了保持喷射状态，就需要高于燃烧反应所需的过量空气。喷射火焰的空气消耗量为“正常”消费量的 400%，包括燃烧和过量空气。对于甲烷喷射火焰，就意味着 60kg 空气/kg 燃料。

8.2.5 计算模型的选择 Choice of Calculation Models

有非常宽广范围的可用模型可选择用于计算火灾大小和载荷。一方面，有许多可利用的简单手工计算模型，主要都是基于经验数据。另一方面，还有几个可利用的计算流体力学(CFD)软件包，都能进行非常复杂的计算。

为了获得火灾载荷可能会有多么严重的一些感觉，使用简化工具通常是良好的开端。如果可能会发生严重载荷，那么明智做法是使用更复杂的工具（假定有更低的不确定性），以更好地了解情况，从而为防护措施工程提供更精确的

基础。

简化模型概述可参见《消防计算手册》(SINTEF,1992)。附录 A 中简要地提及了一些计算流体力学(CFD)软件包。

8.2.6 甲板火灾事件的分析 Analysis of Topside Fire Events

主要火灾类型为喷射火灾、弥漫性气体火灾、池火灾和海上火灾。表 8.4 概括了这些火灾类型所需要确定的主要特点。

表 8.4　火灾载荷的特性

喷射火灾	弥漫性气体火灾	池火灾	海上火灾
· 孔洞尺寸	· 释放率	· 池尺寸	· 扩散
· 释放速率	· 空气供给	· 空气供给	· 风向
· 方向	· 泄漏持续时间	· 风向	· 风速
· 泄漏持续时间	· 空气供给	· 燃烧与泄漏持续时间对比	· 池解体

8.3 海上火灾 Fire on Sea

装有大量原油的压力(或存储)容器(如分离器)的完全破裂将会在瞬间导致原油或多或少地释放至平台上。由于离岸平台上的生产区域通常都由格栅构建这一事实,所有释放的石油几乎都会流入海中,并形成一个面积会迅速扩大的浮油。为防止发生此类场景,已安装了排污系统,但很有可能的是相当大比例的石油将流入海中,这是由于在重大破裂事件中,受到排污系统能容所限。

当浮油在海面上蔓延时,较轻馏分油会蒸发或闪蒸。从容器中释放的包含较轻及较重的馏分显然会产生较高总量的气体。由于油井(特别是海底生产井)的井喷或管线泄漏,在海平面上的火灾也可能会发生。

一直认为非常大的池火灾(直径大于 40m)可能会趋向于分裂成较小基圆直径的几个火焰羽流,从而其火焰高度也要比非分裂火焰高度明显降低。然而,还从未对其加以证实。

在海面上大量原油释放发生立即起火将导致浮油火灾，其燃烧强度将在0.03～0.08kg/sm²范围之内，取决于油中所含轻组分的馏分。似乎最高火焰高度将在25～50m范围之内。由于从海面至底甲板或标准固定设施主支撑框架(MSF)的距离一般在25～30m范围之内，大量释放的原油引起的多数浮油火灾将会冲击主支撑框架(MSF)或甲板下方。最严重的将会把甲板和模块顶部吞没在火焰和烟气中。浮式海上设施具有较低的空气间隙，也就意味着热载荷将会更高。

传统上认为，海平面上火灾产生的热载荷要低于甲板上池火灾产生的热载荷。较低的燃烧强度将导致火焰尖端温度在500～600℃之间，并产生30～50kW/m²之间的热载荷。较高的燃烧强度将导致火焰羽流上部产生热载荷，主支撑框架(MSF)或甲板处的热载荷在50～100kW/m²范围之内，平台腿柱的热载荷在75～150kW/m²范围之内。已测出在大规模试验(BFETS，1998)中的火焰温度高达1 250℃。

缺乏实际经验数据是涉及海上火灾的复杂因素之一。海上火灾的实例极少数是公开的。约在1980年，埃科菲斯克油田经历了一起意外事故，那是一起非常微小且持续时间短暂的事件，但在海上设施上却引起了严重恐慌。约在20世纪90年代中期，也有传闻说在北海和非洲另有一些案例，但那些都未经证实。

海上火灾的另一方面是可能存在的大量成本影响，如果为防止海上火灾而需应用大量被动消防结构的话，这将在第8.3.4节中进一步说明。

海平面上的溢油立即起火通常是由海上设施上流动或坠落的燃烧液滴所造成。

8.3.1 瞬间释放的延时点火 Delayed Ignition of an Instantaneous Release

在起火之前，由于改变传播方向和减速力，石油将扩散至海面上。图8.1所示未起火的浮油直径作为从释放开始后所经过时间的函数。其涉及瞬间释放100m³的稳定原油，并忽略任何风浪或潮流影响。不考虑即时气体闪蒸或轻组分蒸发。由于石油量减少，大量气体闪蒸和蒸发会导致较小浮油。

从图8.1中可见，浮油直径在释放后的首个30sec内迅速增大，在此之后增长速度较为缓慢。例如，在1、2、3和4min后，浮油直径分别约为65、95、120和140m。经过6h后，浮油直径约为370m。很明显，如果在几分钟后点燃该浮油，巨大火焰从理论上讲可能会形成。

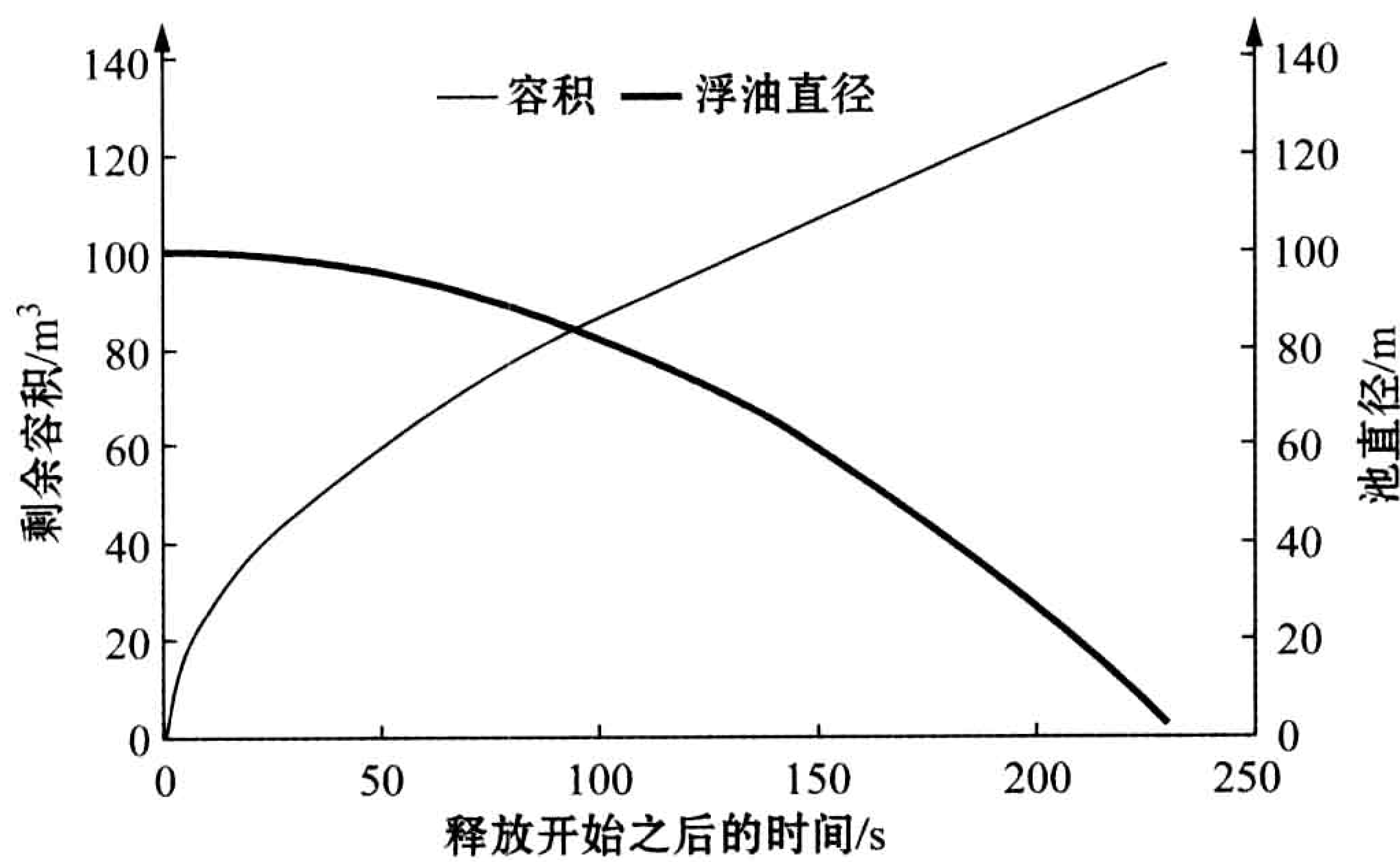


图 8.1　如果石油没有起火，浮油直径作为时间的函数（瞬间释放 $100m^3$ 的稳定原油）

8.3.2　瞬间释放的起火概率 Ignition Probability of an Instantaneous Release

随着时间的推移，由于石油挥发越来越少，起火概率也将相应减少。如果石油在水面上已有一段时间，并且其厚度已减薄，那么受制于辐射热的点燃浮油所需时间将更长。

当热辐射高于 $10kW/m^2$ 时，很难辨别延时起火与油膜厚度对及时起火所产生的影响。随着时间的进展，轻质油组分不断挥发，石油逐渐冷却下来，浮油厚度相应减薄，并可能在一定程度上与水混合。在此情况下，浮油点燃起火的可能性迅速降低。从而原油将获得类似柴油的点火特性，即没有额外起爆物或没有有效热源就不会起火。瞬间释放的新鲜和不稳定原油更容易点燃早先已介绍过的起火源。稳定原油的起火概率是相当低的，因其所有主要轻组分都已蒸发。此类稳定原油闪蒸点高达 125℃。

在释放点的石油温度可高达 90～100℃，但由于热传递至海洋和周围空气中，石油温度就会很快降低下来。在释放后的一段时间内必须提供主要热源以点燃稳定原油的浮油。在大多数离岸情况下是不可能存在此类热源的，除非在平台上已发生重大火灾。

另一方面，如果起火源大约在新鲜原油释放时就已引入（即立即起火），石油就更容易点燃。新鲜不稳定原油的闪点为 1～10℃。然而，起火点可能高达

60～70℃，通常低于石油加工温度。考虑到所有这些因素后可得出结论，瞬间释放直接点火导致持续起火的概率是相当低的。

8.3.3 是什么决定了海上火灾的可能性？ What Determines the Likelihood of Fire on Sea?

海上火灾并不是有据可查的事件。事实上很少在公共领域内明确报道此类事件。井喷是已知的此类事件发生的主要类型。即使是井喷所导致发生海上火灾的情况也相对较少。因此，必须设立可能会导致海上火灾的情形。

挪威科技工业研究院（SINTEF）（Opstad and Guénette，1999）几年来实施了一项审核海上火灾的研究项目。项目包括 1994 年对斯匹次卑尔根群岛进行的大规模试验系列，以及在 1996～1997 年之间的小规模实验室试验。该研究工作的一些主要调查结果简要介绍如下，其涉及的主要方面有：

- 石油流入海洋；
- 石油成分；
- 环境条件。

这些方面将决定是否可能点燃浮油，是否可以预期持续起火。该项目旨在研究起火特性以及海上火灾的热影响，作为涉及海平面上火灾安全管理的输入数据。

在试验程序中用新鲜原油和油水乳剂进行了实验。在一次实验中所使用的石油最高量为 $8m^3$。

8.3.3.1 石油流入海洋 Flow of Oil to Sea

全规模试验表明石油流至海洋表面的方式很重要。我们可能会区分石油直接“跳入”（即自由落体）海面与石油从构件“流入”海面之间的差别。海上火灾的重要性如下：

- 如果石油从平台自由落下，则将会直接“跳入”海中。即使石油是燃烧着从平台落下，在进入海中时就可能会熄灭。

- 石油可能会沿着导管架腿柱、撑杆和立管等“流”下来，并且在进入海面时可能仍在燃烧。在该情况下，熄灭是不太可能的。
- 水下石油释放可视作为“跳入”海中的石油，但可能是更明显“风化”(乳化)。那么，起火将取决于在该区域内是否有强大的外部起火源。

8.3.3.2　石油成分 Oil Composition

液体表面上最轻馏分的蒸发是决定持续燃烧能力的主要机制。挪威科技工业研究院(SINTEF)进行的实验室试验证实，如果在原油中含有足够数量的较轻馏分，边界层仍继续存在疾风条件。

另一个推断是已确定了不同石油之间的巨大特性差异。有些石油的蒸发性能会大大高于其他石油的蒸发性能。显然凝析油最容易点燃。挪威科技工业研究院认为石油可燃性取决于沸点低于 150℃的易燃成分含量。

8.3.3.3　环境条件 Environmental Conditions

由于明显的局限性，不同环境条件下的易燃性和持续燃烧试验已成为了研究所面临的最困难方面之一。在斯匹次卑尔根群岛进行的大规模试验，其风速达到 5～10m/s。在实验室试验中使用的空气流动速度达到 25m/s。对于具有最高蒸发率的石油，依据最高风速有一个有限效应。应该指出的是，该实验室的空气流动速度 25m/s 只是在水面上方约 1m 处所测量的，而正式风速是在水面上方 10m 以上所测量的。在水面上方 1m 处的 28～30m/s 风速很可能相当于 55～58kn 的风速。该风速接近于 64kn 起始的飓风。

由于自然原因，在这些试验中还未对波浪运动进行研究。大规模试验有一部分是在水池内(在海冰内!)进行，另一部分是在避风泻湖内进行。有效波动作用的可能性在两种场景下都不存在。

波动作用对浮油燃烧的总体效应将最大限度地影响最薄浮油，该浮油接近起火临界最小厚度。当石油风化时，持续起火的最小油膜厚度会随时间而增加。非破碎波将在油膜厚度内采用小幅波动，并将在任何时候影响浮油面积的比例。如果油膜厚浓，则除了略微增强稀释浮油上方的蒸气云之外，并不会对点火性能产生任何明显影响。破碎波会瓦解浮油较薄区域。虽然这只会影响

在任一时刻比例很小的浮油面积，但其厚度不会恢复。破碎波的累积效应将能够打碎水面连续光泽。这将有效防止火焰蔓延和持续燃烧。

狂浪作用的效应仍有相当大的不确定性，特别是在高风速中相当普遍存在的破碎波和众多浪花。有人声称蒸发率在强风状态下不会有明显改变，但这仍是不受支持的假设。然而，普遍认为在强风场景下几乎不可能会发生剧烈燃烧和持续燃烧。而且都适用于“风化”和“新鲜”溢油（即很少或根本没有发生过风化）。

图 8.2 所示为不同风速条件下的结果（SINTEF，2005），该图表明起火机会在低风速时几乎不受热传递的约束，但在高风速时很大程度上取决于热传递。

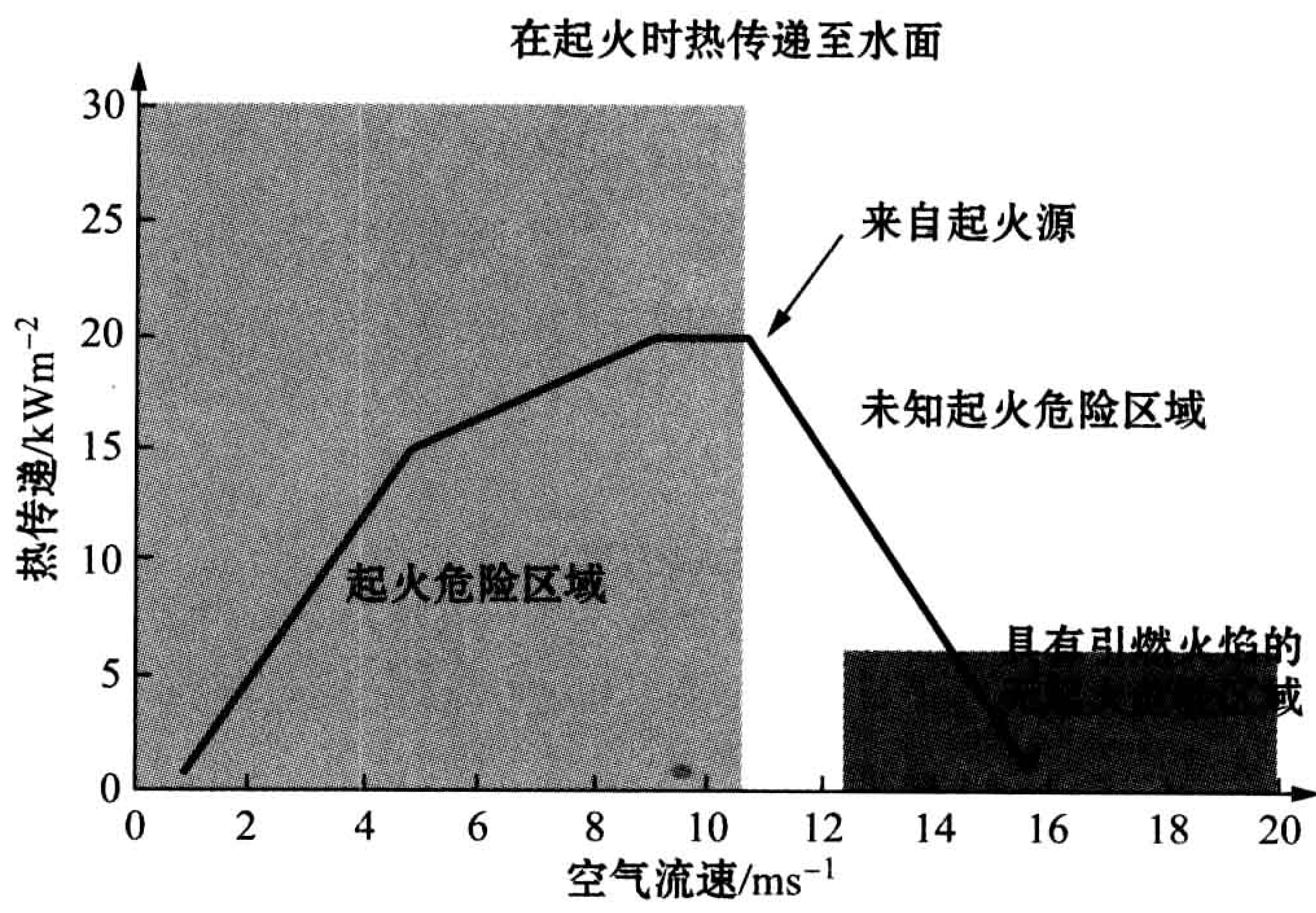


图 8.2　在实验室试验中起火时热传递至水面（挪威科技工业研究院认可）

表 8.5（Opstad and Guénette，1999）给出了挪威科技工业研究院（SINTEF）进行试验的结果摘要。应该指出的是，其包含的影响仅限于大风的影响，并没有包含大风与海浪相结合的影响。

8.3.4　海平面火灾的载荷 Loads from Sea Level Fire

海平面火灾产生的多数严重火灾载荷可能会涉及用于保护结构的许多被动消防所需的大量成本。因此，考虑下列参数尤显重要：

表 8.5　海平面火灾受天气影响的起火条件和持续燃烧

条件＼石油类型	凝结	轻质原油	原油
最小浮油厚度/mm	0.5	1	1～3
最大蒸发损失/%	> 30	< 30	5～10
最大油包水型乳化液/%	未知	未知	<25
最大风速条件/ms^{-1}	25	20～25	15

- 火焰规模；
- 燃烧持续时间(即燃烧率和总量)；
- 火灾载荷；
- 烟气。

考虑将几年前安装在挪威地区的浮式生产设施作为例示。下列构件采用被动消防来防止海平面火灾：

- 支撑结构(柱)；
- 甲板支撑结构(梁)。

计算载荷的评估是基于保守方法，并造成了下列所示的高火灾载荷：

- 柱：
  - ○ 250kW/m^2，海平面上高达 15m
  - ○ 200kW/m^2，15m 以上。
- 主结构梁(顶边模块支撑)：
  - ○ 200kW/m^2。
- 所有构件都受到 2h 燃烧持续时间的保护。

受保护的总表面积约为 13 000m^2。如果根据目前价格假设平均价格为每平方米 600 美元，那么结构的被动防火保护设施的成本约为 800 万美元。但是，如果保护设施必须在现场更新，即使该价格可能还是低位值，离岸设备再运用的成本将高出数倍。

8.3.4.1 火焰规模 Flame Dimensions

浮油蔓延有 3 个阶段(Fay,1969):重力驱动、有限粘性力和表面力有限蔓延。在海面上燃烧石油层的直径取决于产生燃烧石油层的场景,其中包括许多因素。为计算燃烧石油层的可能范围,需要知道下列所有内容:

- 液体类型,包括密度;
- 溢漏是连续的还是瞬时的;
- 泄漏量或泄漏率;
- 涉及开始溢漏的起火时间。

实验室试验(SINTEF,2005)表明可能会发生逆风火焰蔓延,但对于最重的原油并非如此。逆风火焰蔓延也可能受强风限制。侧风火焰蔓延速度差不多也与逆风速度相同。

8.3.4.2 燃烧持续时间 Fire Duration

燃烧持续时间首先取决于是否为持续释放。只有在油膜厚度超过最小限值的厚度时燃烧才会持续。

8.3.4.3 火灾载荷 Fire Loads

大规模试验获得了惊人高的热通量。某些区域内的火焰温度达到了1300℃或更高。非常炎热区域位于火焰夹带足量空气的湍流涡旋处,以便能够完全燃烧,并且该火焰视觉厚浓。

烟尘屏蔽将滞留火羽流内的一些热量,并增加被吞没物体的温度和热载荷。因此,在火羽流内物体的火灾载荷与陆地上实验中发现的大致相同。笼罩在火焰内的物体可能会经历波动的热载荷,其峰值约为 400kW/m^2,平均值可能约为 200～300kW/m^2。

只要没有发生建筑物明显阻挡风力的情况,在强风中的热暴露将主要作用于接近于地面的物体上。

8.3.4.4 烟气
Smoke

这方面的问题不会影响构件，但是对于人员的影响可能会非常严重。该情况从图 8.3 中可见，图中所示为使用 $8m^3$ 稳定原油进行的海平面上火灾试验。溢漏被限制在直径 10m 的环型中，当其点燃后，能够自由流动，该直径逐渐增大至近 50m，并燃烧持续约 15min。火焰高度达到 60m 以上，但仅在几秒钟内脉动。从图中可见黑烟的范围。



图 8.3　1994 年在斯匹次卑尔根群岛的海平面火灾试验（作者拍摄）

8.4 烟气效应分析 Analysis of Smoke Effects

8.4.1 烟气特性的预测法 Methods for Prediction of Smoke Behaviour

烟气是在火灾中人员所受到的主要危害之一，特别是在石油火灾中。由于浓浓黑烟而降低的能见度是想要逃生或欲灭火人员首先面临的威胁。有关烟气产生、烟流和烟气对人员和设备影响的知识均可从相关文献、实验室试验以及类如帕玻尔·阿尔法油井事故的真实火灾经历中获得(Lord Cullen，1990)。基于计算流体力学(CFD)的计算机代码需要烟气产生和散布的实际建模(Holen and Magnussen，1990)。

在封闭碳氢化合物火灾中的烟气产生主要受制于燃料特性和通风条件。标称通风因子 a 的空气与燃料比率能确定某些状态，包括从具有氧气匮乏特点的低化学计量条件的火灾，至通风良好的化学计量火灾。

8.4.1.1 质量流率 Mass Flow Rate

海上平台的重要火灾场景是封闭式火灾。在该情况下所估计的烟气产生与开放式火灾不同，因燃烧产物可再循环至火焰。封闭空间本身可被视为一间燃烧室，并且封闭空间的质量和热量平衡是估计温度和确定烟气产生率以及烟尘和气体浓度的基础。

在封闭空间中的烟气产生率的粗略估计可通过将完全燃烧所需空气量乘以燃料的燃烧率而获得。对于大多数碳氢化合物燃料，烟气产生率约为燃料的燃烧率的 15 倍。该数字可以用 Ka 表示，即空气质量与燃料质量的化学计量比。若空气供给足以能进行完全燃烧的大火，当已知燃料的燃烧率时，就可计算出烟气的总质量速率。总烟气产生率为：

$$\dot{m}_{tot} = \dot{m}_f + k_a \cdot m = (1 + k_a)\dot{m}_f \approx 16\dot{m}_f \tag{8.4}$$

式中：

$\dot{m}_{tot}$——火焰产生烟气的总质量流；

$\dot{m}_f$——燃料的燃烧率；

k_a——空气质量与燃料质量的化学计量比。

这给出的第一步预估是是在高温下会产生一定量的烟气。然后，火灾产生的烟气与夹带的空气混合，如果有过量空气，该过程在消防模块内继续，或者当烟气逃逸时，在模块外进行。该混合过程稀释了烟气，从而降低温度、烟尘浓度和有毒燃烧产物的浓度。然而，通过与新鲜空气混合，在烟气中的氧气浓度会增加。大规模烟气产生率的预测取决于燃料的燃烧率，以及火区封闭空间的通风设备。

8.4.1.2　温度
Temperature

烟气温度离开火区封闭空间是燃烧条件的结果。如果假设“最坏情况”的火灾烈度，最高烟气温度将达到约 1 200℃。在多数情况下可预期会明显低于此温度。在火区封闭空间内“最坏情况”的火灾发展导致平台上人员受到最严重烟气危害并不明显。在隔火间开口处形成的非常炎热的烟羽会有强大浮力，并趋于迅速升起。在某些情况下这将是有利的，因为烟气可以飘动在平台上方。较凉的烟羽将更有可能跟随着平台周围的空气流场，并且可能与较下层的逃生路径和救生艇站发生冲突。

8.4.1.3　烟尘产生
Soot Production

烟尘产生率可用于表示烟尘产量，并用烟尘产生率与燃料燃烧率的比率来表达。烟尘产量随着在火区密封空间内燃料类型和燃料几何构造以及空气与燃料的燃烧率而变化。

传统建材和家具的烟尘产量一般约为 1%～2%。液态和气态碳氢化合物燃料通常具有远远高于该水平的特有烟尘产量。

8.4.1.4 一氧化碳
Carbon Monoxide

对于通风良好的火灾，在舱室内和出口处的一氧化碳(CO)浓度通常低于0.1%。该特点是空气与燃料的比例高于50。

在空气供给有限的火灾中，当空气与燃料比接近于化学计量比(15kg/kg)时，一氧化碳(CO)浓度上升至2%左右。当空气与燃料比高达化学计量比3倍时，可发现在火灾中的一氧化碳(CO)浓度高于0.5%。对于受通风制约的火灾和氧气匮乏的火灾，理论上一氧化碳(CO)浓度可高达35%。在实践中，当空气与燃料比约为化学计量比的一半时，在通风不良密封空间内的扩散火焰中可测到5%的一氧化碳(CO)浓度。该浓度可能被认为是在离岸火灾中一氧化碳(CO)实际最大浓度。

8.4.1.5 二氧化碳
Carbon Dioxide

二氧化碳浓度是随着空气与燃料比而变化，并且挪威科技工业研究院(SINTEF，1992)在实验中测量到出风开口处有14%的最高浓度。

8.4.1.6 氧气
Oxygen

在出风开口处的氧气浓度是随着空气与燃料比而变化，从化学计量比接近零度始，至周围环境空气浓度普遍存在过量空气的状况。

8.4.2 烟气流动和散布
Smoke Flow and Dispersion

自然通风场所的火灾烟气将通过开口处和具有百叶窗的墙壁逃逸出去。热气体比空气轻，因此，浮力将产生一股烟羽。平台周围环境具有风向和风速明显的特点，并将影响烟羽。烟羽和风力与平台自身互相作用，从而产生流速增加及回流区的区域。需应答的重要问题如下：

- 烟气在离开防火区开口处后可以往下引流吗？可以向下引至平台下面吗？

- 烟气可以逆着风向流动吗?
- 烟气会进入生活区域通风系统的进气口吗?
- 烟气会渗透至高压生活区吗?
- 如果通风系统关闭后,烟气将会怎样快速地渗透至生活区?
- 在指定火灾场景,哪些区域将受到烟气的威胁?
- 烟气对人员产生的主要影响是什么?

烟气产生危害的特点具有 3 个因素:

- 移动性的下降;
- 由于烟气温度,对人员造成痛苦和伤害;
- 由于烟气中的有毒或刺激成分导致人员丧失能力或死亡。

通过比较阈值与在火灾场景下的实际或预测暴露值,可以发现这些因素的相对重要性。

当烟尘浓度取决于烟尘产生率和散布的建模,就可以将其转换成视觉长度。烟尘颗粒会阻碍光线通道,并且能见度取决于光源强度、烟尘浓度和光的波长。

物体的可见度取决于该物体与其背景之间的对比度。例如,看到发光标志要比看到反光标志的速度快 2 至 4 倍。

8.5 对火灾的结构响应 Structural Response to Fire

8.5.1 手工方式 Manual Methods

最简单的方法是直接基于火灾试验的结果,而最复杂的计算机模型计算结构构件内温度的升高是基于给定温度暴露曲线和取决于温度的材料热特性。

8.5.2 非绝缘钢 Uninsulated Steel

当未受保护的钢构件暴露于大火中时，在大多数情况下，温度在几分钟之内就会上升至临界水平。临界水平是指结构构件无法履行其承重功能。然而，如果型钢是重型的，并且温度范围适中，该结构可能会在没有进一步防火措施的情况下具有足够时间来承受载荷。未受保护的型钢温度可通过使用式 8.5 的迭代过程进行预测（SINTEF，1992）：

$$\Delta T_s = \frac{h_{cr}}{c_{ps}\rho_s}\frac{A_i}{V_s}(T_g - T_s)\Delta t \tag{8.5}$$

式中：

ΔT_s——型钢内温度升高（℃）；

T_s——在时间 t 内的型钢温度（℃）；

h_{cr}——h_c+h_r热传递系数（包括对流和辐射热传递）（W/m^2℃）；

c_{ps}——钢材的比热（J/kg℃）；

ρ_s——钢材的密度（kg/m^3）；

A_i/V_s——型钢的截面因子（m^{-1}）；

A_i——构件每单位长度的绝缘材料内表面面积（m^2/m）；

V_s——构件每单位长度的体积（m^2）；

T_g——在时间 t 内的气体温度（℃）；

Δ_t——时间间隔（s）。

该式是基于假设钢铁被视为散热器的一维热传递的准稳态。由于钢材的高导热系数，对该构件的热供应被视为是瞬间分布的统一温度。

当型钢是大型的，在横截面内可能会有相当高的温度梯度。在该情况下，合适的计算机代码应该用于预测更准确地温度响应。

8.5.3 绝缘钢 Insulated Steel

几乎没有适合于手工计算具有被动消防的钢材温度响应。可用的那些方

法不适用于所有类型的防火材料。这些方法是当钢材和绝缘材料的材料特性都作为常数时的简单迭代方程。然而，钢材和绝缘材料的热特性可能与温度有很大不同，通过该计算获得的结果应仔细与试验结果核对。

8.5.3.1　简单计算方法
Simple Calculation Methods

在暴露的绝缘钢结构中，手工计算温度的简单方法仅限于一维方法。在时间间隔 Δt 内使用干燥物料的绝缘钢构件，其钢材温度升高 ΔT_s 是根据式 8.6 进行计算的(SINTEF，1992)：

$$\Delta T_s = \frac{\frac{\lambda_{ci}}{\delta_i}}{c_{ps}\rho_s}\frac{A_i}{V_s}\left[\frac{1}{1+\frac{2\varepsilon}{3}}\right](T_g - T_s)(e^{\frac{\varepsilon}{5}} - 1)\Delta T_g \tag{8.6}$$

$$\varepsilon = \frac{c_{pi}\delta_i\rho_i A_i}{2c_{ps}\rho_s V_s} \tag{8.7}$$

式中：

λ_{ci}——用于绝缘的导热系数(W/m℃)；

δ_i——绝缘的厚度(m)；

c_{pi}——绝缘的比热(J/kg℃)；

ρ_s——钢材的密度(kg/m^3)；

c_{ps}——钢材的比热(J/kg℃)；

ρ_i——绝缘的密度(kg/m^3)；

A_i/V_s——型钢的截面因子(m^{-1})；

T_g——在时间 t 内的周围气体温度(℃)；

T_s——在时间 t 内的钢材温度(℃)；

ΔT_g——在时间间隔 Δt 内周围温度的增加(℃)；

Δt——时间间隔(s)。

此类公式对于干燥物料绝缘的钢构件是有效的。对于湿物料的钢材温度升高 ΔTs 的计算是基于相同公式，但经过下列更改：

(a) 在钢材温度达到 100℃时，使用式 8.6。

(b) 在钢材温度达到 100℃时,引入钢材温度上升的延迟 ΔT_v。预测时间延迟的方法在挪威科技工业研究院(SINTEF,1992)中有相关介绍。

当使用手工计算暴露于大火中的绝缘钢结构温度时,应仔细选择绝缘材料的材料数据。首先,导热系数是随着温度而变化。如果导热系数是用单一值描述的,应使用相关的平均值。其次,所有材料都有一个有效性温度的上限,计算不应超出该水平进行。第三,力求采用试验结果来验证计算确实是很好的方法。

8.5.3.2 电脑计算 Computer Calculations

应用于构件的温度分析有许多非线性计算机代码。大多数计算机代码可以解决一维和二维问题,尽管只有一些代码能解决三维问题。SUPER-TEMPCALC 和 TASEF-2 是两个可以在个人电脑上运行的代码。

两个代码都是基于有限元法(FEM),并涵盖一维和两维的热流。计算机代码可以分析暴露在任意时间/温度曲线的线性构件的横截面。该横截面可以包含不同材料,并且热特性(λ,c_p)可作为温度的非线性函数。热暴露既可以为给定对流和表面发射率值的时间/温度曲线建模,还可以为规定的时间辐射关系建模。空洞部分也可加以分析。

所分析的截面可分为一个单元网,控制瞬态热传导方程解答了每个元素边界。

图 8.4 显示了绝缘工字型钢柱的单元网。钢柱均匀受热,并且由于有两根轴对称线,只有 1/4 的横截面需要进行分析。

计算结果不应予以认可,除非记录了输入参数的有效性。最好是通过与适当试验结果比较后,该计算机代码的有效性已得到证实。

当采用手工方式时,应仔细选择材料的热参数 λ 和 c_p。在使用一定范围之外的 λ 和 c_p曲线时,对于某些材料(石膏板和矿物棉)更应特别仔细考虑。当石膏板已达到了 600～650℃温度时,化学结合水会释放和蒸发,石膏板就会失去其强度,并可能脱离其保护结构。计算时,通过迅速增加传导率曲线(如在 600℃)可对该情况进行合适的仿真。

采用有限元法(FEM)计算机代码进行温度分析的结果可表示为个体结点的时间/温度曲线,或表示为给定时间的等温线图。

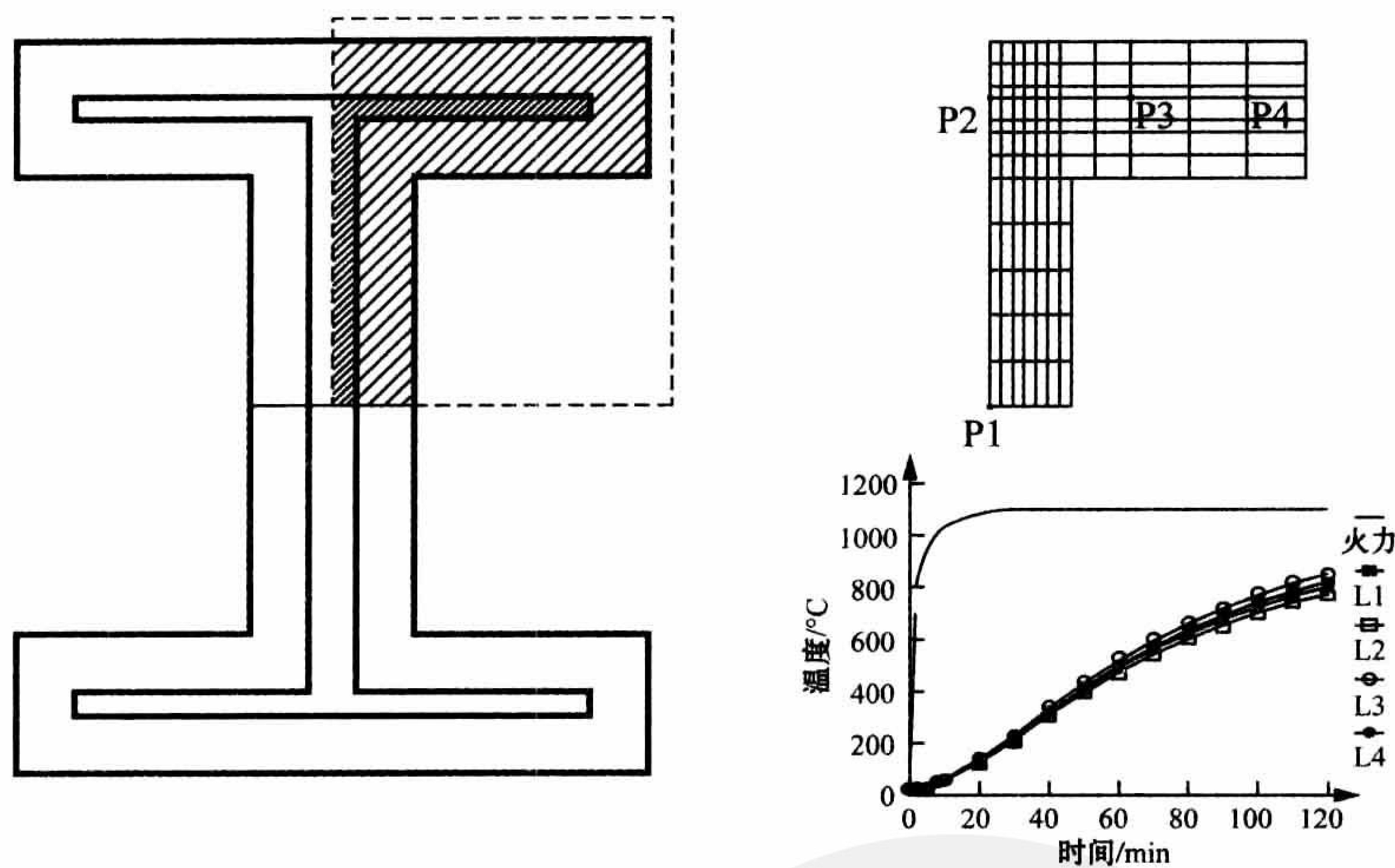


图 8.4　绝缘工字型钢柱的单元网

8.6　降低风险的手段 Risk Reducing Measures

8.6.1　概述 Overview

多年来涉及火灾危险的降低风险措施已成为技术安全学科的重点。已发表了多篇关于该主题的论文和报道，所以在此没有必要更深地研究该科目。所有相关方面的详尽讨论均超出本书讨论范围，因本书专注于风险量化。

ISO 13702 标准出版于 1999 年，其涉及主题(ISO，1999b)“海上生产设施火灾和爆炸的控制和缓解——要求和指南”。下列是 ISO 13702 标准有关火灾危险性减少的部分：

5）海上设施布局；
6）应急切断系统和放空；
7）起火控制；

8）溢漏控制；
9）应急电源系统；
10）火灾和气体系统；
11）主动消防；
12）被动消防；
15）检查、试验和维护。

如果遵循典型事件树的逻辑性（例如，见图 6.10），那么风险降低措施可能构造如下：

- 泄漏预防
  - ○ 焊接连接；
  - ○ 减少泄漏可能性的法兰类型。
- 检漏
  - ○ 气体探测；
  - ○ 火灾探测；
  - ○ 应急切断系统；
  - ○ 放空系统。
- 起火预防
  - ○ 明火作业程序；
  - ○ “事前”保护设备；
  - ○ 电气设备的维修。
- 事态加剧预防
  - ○ 海上设施布局；
  - ○ 区域隔离；
  - ○ 主动消防；
  - ○ 被动消防。

8.6.2 当前的研发经验 Recent R&D Experience

通过所谓的“顶边系统爆炸冲击与消防工程”计划（BFETS），SCI（1998）已实施了最大范围的研发工作。该方案包括了火灾和爆炸的研究，涉及爆炸的经验将在第 9.1.2 节中讨论。至于涉及火灾的研究，一些主要问题包括：

- 已建立了喷射火焰以及池火灾的真实火灾载荷。其中一些火灾载荷略高于预期。
- 已发现在通风封闭空间内的池火灾所给出的热载荷几乎与喷射火焰一样高。
- 已发现使用主动消防(如喷淋水系统)甚至比预期的更有效,尤其是在通风封闭空间内。

8.7 结构消防的量化 Dimensioning of Structural Fire Protection

8.7.1 案例说明 Case Illustration

所选案例用于说明结构被动消防(PFP)的量化,涉及现有海上设施甲板结构的升级换代。所述的甲板结构问题是由桁架与箱型截面构件组成的模块支撑结构。在相对开放的结构内部安装了数量有限的生产设备。

案例研究将展示必要的计算和风险评估,以确定受影响最严重的结构部件是否可能有效地受到被动消防(PFP)的保护,以及如何可能有效地达到该目的。

8.7.2 火灾量化 Dimensioning Fire

有关海上设施消防和防爆(NPD,1992a)的挪威规范以及结构设计和保护规范(NPD,1992b)中早先对消防设计的要求,已由挪威石油标准化组织(NORSOK)N-001(NORSOK,2004a)和 N-003(NORSOK,1999a)的要求所取代。此类要求基本相同,就其意义而言,承重结构的适当消防需涉及火灾量化。因此,重要的是要确定火灾量化是什么,以及相关联的火灾载荷是哪些。

应该指出的是，当采用被动消防（PFP）时，还需具有能力以承受量化的爆炸载荷，从而防止爆炸后发生火灾的场景。因此，被动消防（PFP）尚需防爆处理。在后面章节对此也有讨论。火灾量化的主要特点如下：

- 热负载；
- 火灾规模；
- 燃烧持续时间。

使用这 3 个参数的常数值有时会显得过于简单化。下面例子可以说明这一点。如果装满液体的船舶的装载物（稳定原油）溢漏至甲板上，并且未得到排污系统的仔细处理，就会导致甲板上形成假定为 20m 直径的液池，那么其造成的火灾将会有相同直径，高度也约有相同数值。更现实的是其高度将受限于两甲板之间的距离。平均热载荷时间将取决于通风率和火焰的空气供给情况，但通常可能为 150kW/m^2。如果最初溢漏为 50m^3、直径为 20m，且平均燃烧率为 3mm/min，那么该液池的平均厚度为 0.159m，其燃烧持续时间略高于 53min。

从理论上讲，在燃烧持续时间内的火焰直径和高度应为常数。然而，在实践中，经验表明液池的规模将会缩小，火焰高度也会降低（除非受限于其他方面的约束，如甲板之间的距离等）。在海面上原油燃烧的全面试验中，海面上不受约束的石油层尺寸不同，如图 8.5 所示。在该试验中的石油层在点燃前的实际尺寸限定为 10m，起火后其尺寸不受约束。初始阶段的情况必须考虑依据这些约束条件。

刚开始，通常会合理地认为火灾规模和火灾载荷是常数。在该情况下，需考虑的唯一变量就是燃烧持续时间。

8.7.3 燃烧持续时间的分布 Fire Duration Distribution

如果略计除持续时间之外的所有变量为常数，那么最终需面对的是“一维问题”。因此，取决于火灾量化的结构完整性评估受到火灾反应分析的限制，在可适用的载荷下作为时间的函数。关键问题是需要确定在大火消退前是否发生失效。基于设计意外事件（DAE）的理论定义，一般认为是不可能确定火灾的“设计意外事件”。因此，使用了诸多实际因素，包括考虑下列各种因素：

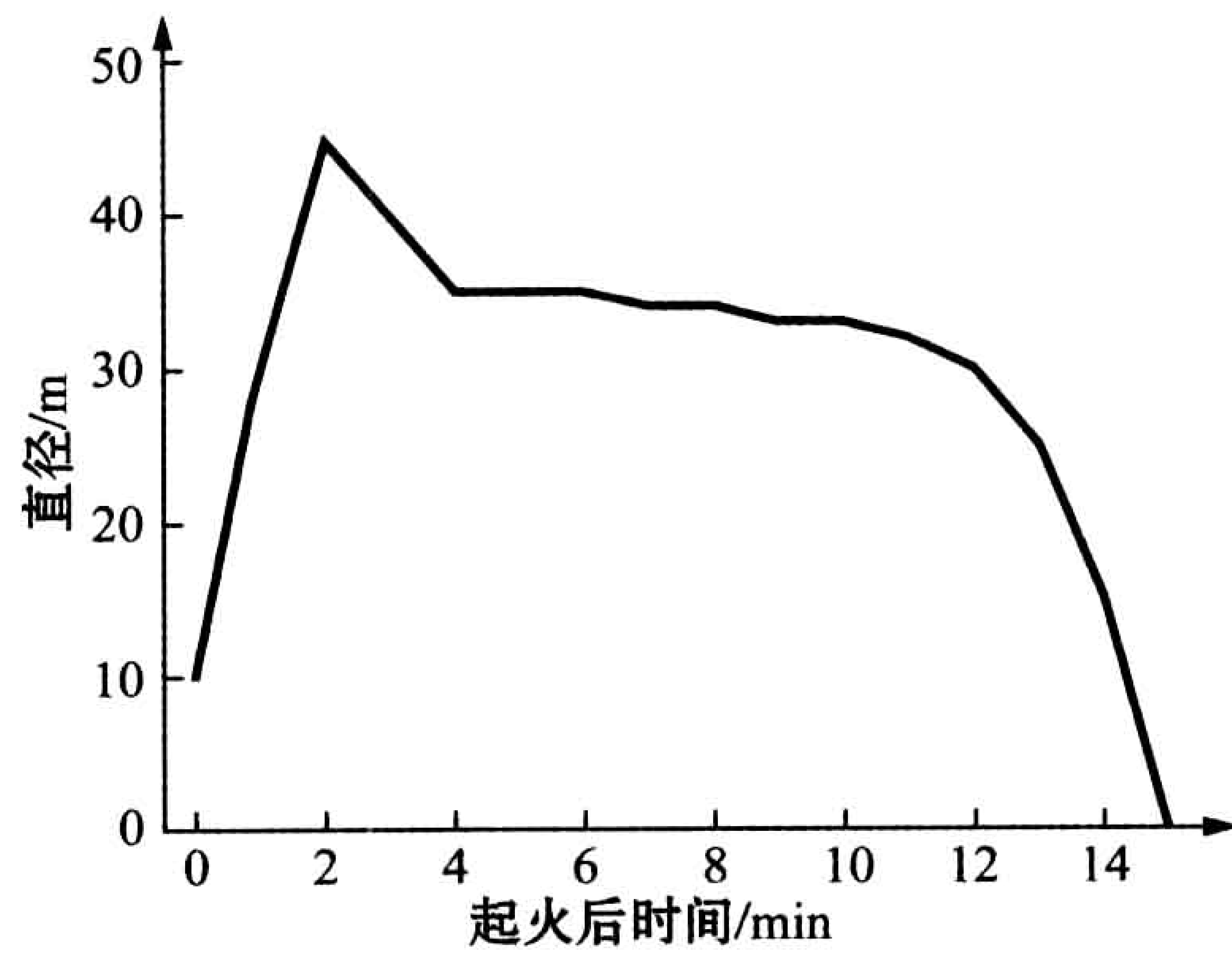


图 8.5　在海面上燃烧石油层的直径作为起火后时间的函数

- 应急切断区段的容积；
- 减压能力和时间；
- 应用于设备和结构上的被动消防（PFP）。

图 8.6 所示为（支撑结构内部）底甲板的超标频率函数作为燃烧持续时间的函数，对于案例研究海上设施，请参见第 8.7.1 节。

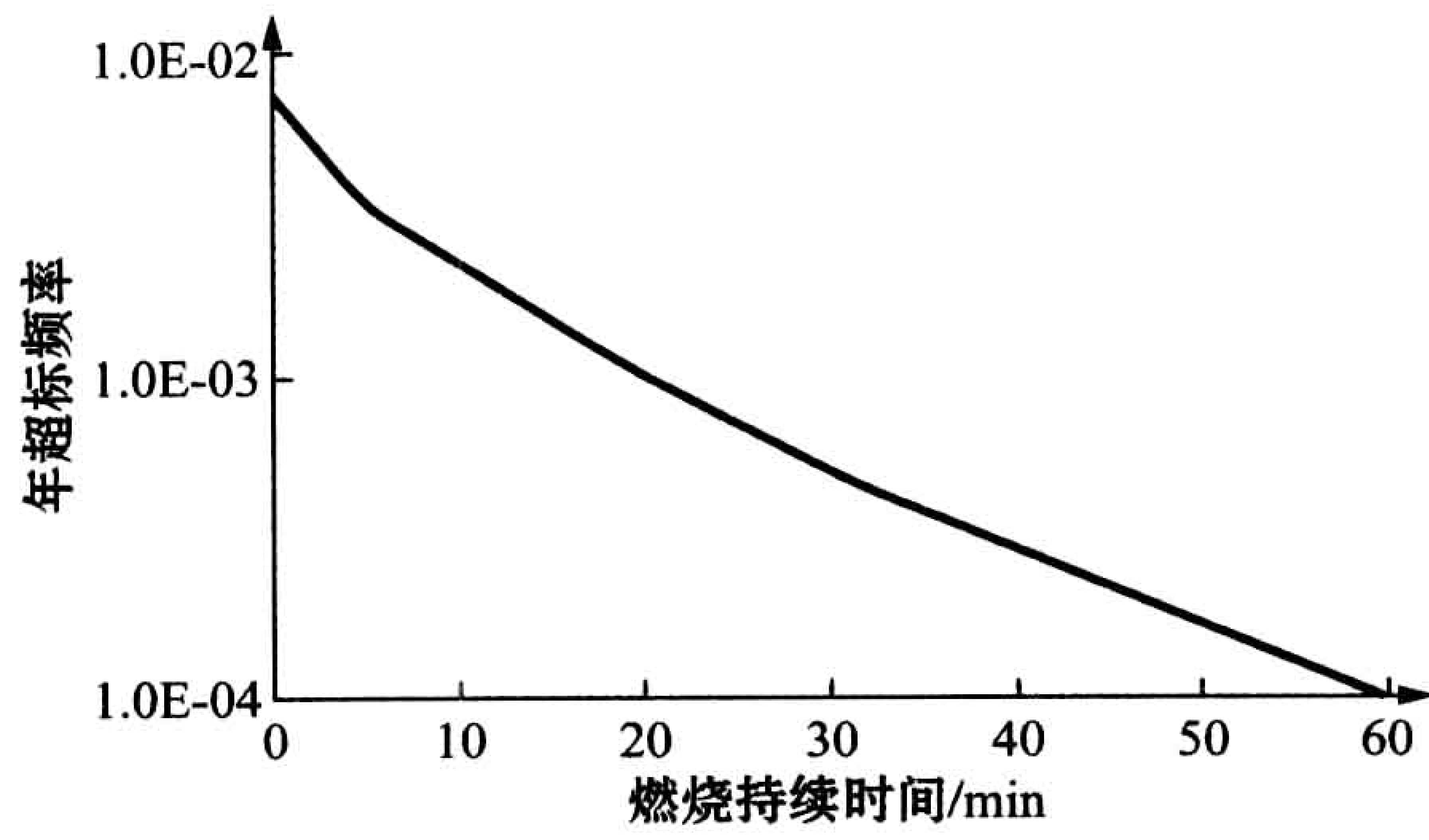


图 8.6　底甲板上燃烧持续时间的超标频率分布

所有火灾（超过 0min）的频率为每年 $7.3 \cdot 10^{-3}$，而火灾年度频率超过 20min 持续时间的为 10^{-3}。对应于 10^{-4} 超标频率的持续时间为 60min。根据

挪威石油标准化组织 S-003(NORSOK,2004)的要求,10^{-4}超标频率应作为结构设计的设计基础。

图 8.7 所示为相同的分布,其中有条件的超标概率以相同燃烧持续时间表示。条件概率是基于底甲板内部发生的火灾。

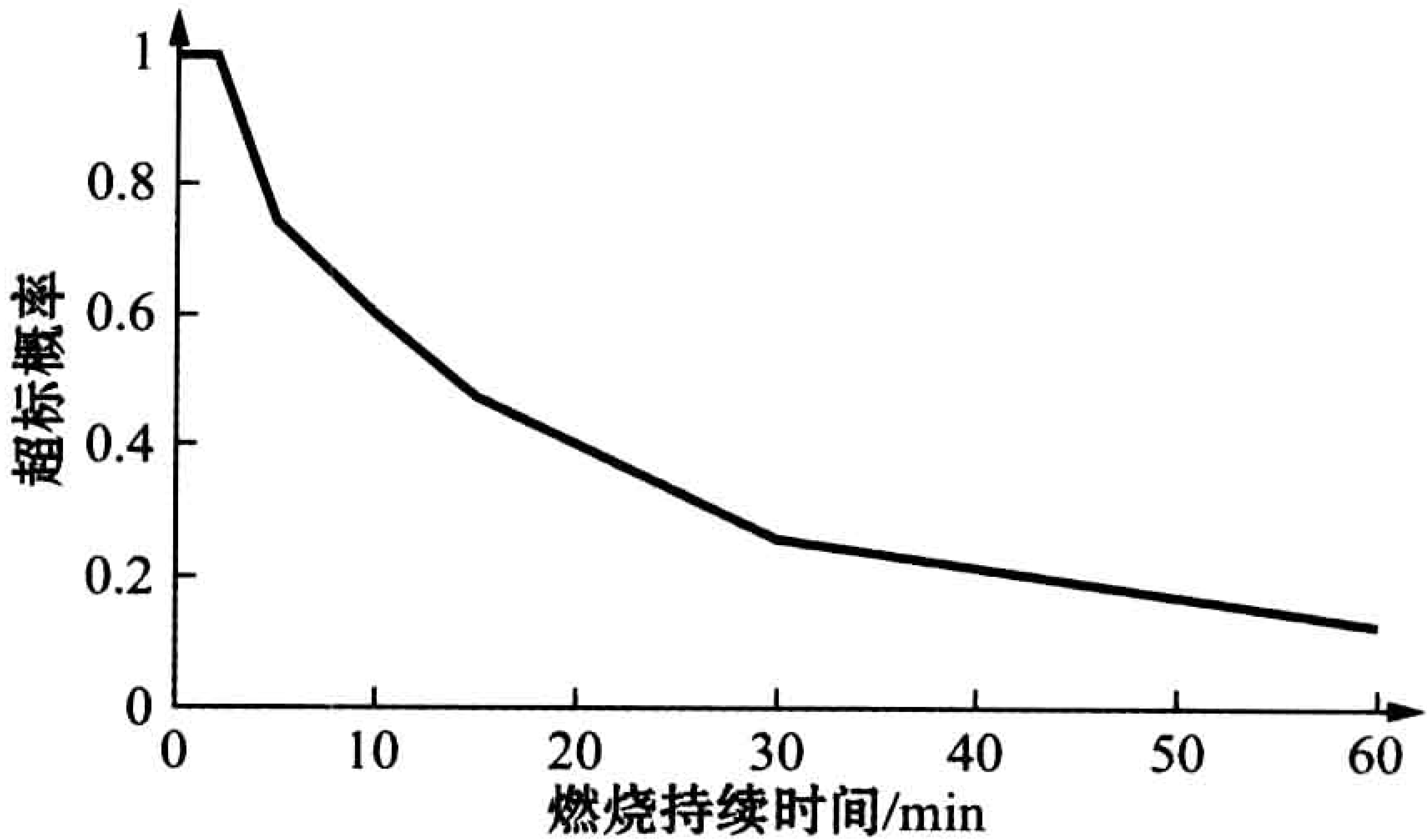


图 8.7 底甲板上燃烧持续时间的分布

由此可见,燃烧持续时间超过 6min 的概率约为 70%。燃烧持续时间超过 15min 的概率为 50%,而燃烧持续时间超过 40min 的概率为 20%。

为确定火灾量化的持续时间,尚无可接受的方式能用于解释这些曲线。如果选择条件分布的中间值,那么就将意味着 15min 火灾量化的持续时间。

8.7.4 火灾量化的定义 Definition of Dimensioning Fire

根据早先挪威石油管理局(NPD)规定的承重结构(NPD,1992b),式 8.8 给出了火灾量化的定义。火灾量化是由下式所定义的:

$$p(\text{系统失效}) = P(\text{系统失效} / \text{火灾}) \cdot P(\text{火灾}) \leqslant 10^{-4} \tag{8.8}$$

该定义适用于图 8.8 所示的超标概率曲线。对应于10^{-4}超标概率的燃烧持续时间约为 37min。该图不仅给出了火灾频率,还给出了所示燃烧持续时间的失效概率以及由此产生的超标频率函数。

8.7.5　USFOS®软件工具建模 USFOS® Modelling

USFOS®程序被定制用于极端环境和意外载荷（如船舶碰撞、火灾和爆炸）情况下的导管架和顶边结构连续倒塌的分析。该程序基于广义的连续介质力学原理，并依据非线性几何学和材料效应，包括促进高效非线性静态或动态分析的几种特性。支持该模式的基本概念是使用有限元来为每个结构部件建模，并且仍能获得非线性材料和几何效应的真实再现。

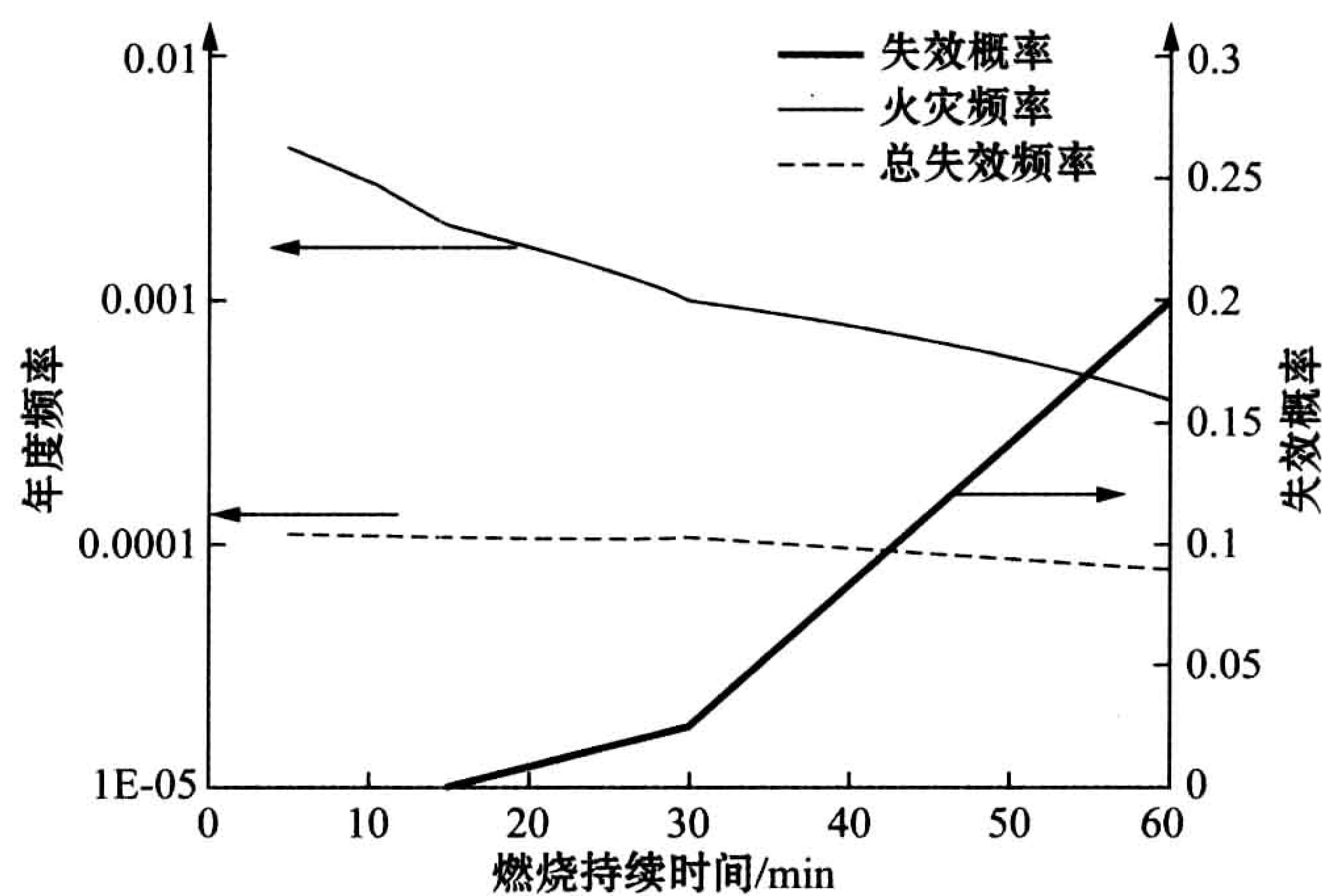


图 8.8　火灾和系统失效的发生频率以及由此产生的系统失效超标频率

由于采用位移插值函数，USFOS®可预测轴向受压构件的任意端点条件和节点力的精确屈曲载荷。通过在横梁两端和中间截面引入屈服铰，可产生非线性材料特性。而基于边界曲面理论可在力空间建立塑性模型。这里所说明的热载荷效应包括高温下的屈服应力和弹性模量 E 的热膨胀与缩小。温度载荷对弹性元件的影响需产生涉及轴向膨胀以及因温度梯度而弯曲于横截面上的弹力。弹性模量 E 的热膨胀和缩小产生了一致的节点力。在边界面概念内，屈服面和边界曲面两者都会因温度上升而（以不同速率）缩小，反映了横截面能力的降低。

8.7.5.1 风险降低设备场景的应用 Application in Risk Reduction Context

已实施了全面的 USFOS®分析，以便能进一步了解模块支撑框架的防火性能，以及在所选构件上安装被动消防(PFP)的可能效应。3 个位置可予以考虑，参照下列情形：

- 西南角；
- 东南角；
- 竖井顶部周围的框架结构。

东南角显得尤为关键，因为该部分的主支撑框架(MSF)支撑着沉重的模块。主支撑框架(MSF)的火灾载荷定义如下：

- 西南角　　弥漫性气体火灾，直径 18m 的球体被甲板之间的距离截去了顶端；
- 东南角　　冷凝池火灾，直径 24m 的球体，火焰高度受限于甲板之间的距离；
- 竖井顶部周围的框架结构　　弥漫性气体火灾，直径 18m 的球体被甲板之间的距离截去了顶端。

概率安全分析(PSA)规范要求在计算被动消防(PFP)时不考虑主动消防(喷淋系统)。另一方面，在量化风险评估(QRA)中可能会考虑主动和被动系统两者的组合效应。在目前情况下，表 8.6 中所示的载荷被作为典型载荷而得到应用。

表 8.6　根据火灾类型和消防水应用的典型火灾载荷

火灾类型	根据使用的消防用水的典型载荷/kWm^{-2}	
	有消防水	无消防水
弥漫性气体	150	200
液池	100	150

研究中所使用的数值与挪威石油标准化组织 S-001(NORSOK,2000)所建议的不同。这些数值将在第 13.6.1.4 节中予以讨论。应该指出的是,USFOS FIRE®软件包具有一个模块,其可用于计算作为燃料给气式通风和时间函数的详细火灾载荷。

当模块通风不足或通风过度时,详细而具体的分析将会是特别重要。当通风约为化学计量比(每 kg 碳氢化合物燃料为 15～16kg 空气),通常范围每 kg 碳氢化合物燃料为 10～20kg 空气时,表 8.6 中所示的典型值换言之就可用(有点保守)。应该指出的是在分析中使用了下列失效准则:

- 支撑结构的失效: 任何方向的相对运动超过 0.3m 时,认为会发生支撑结构失效。该运动可能并不一定意味着会崩溃,但可能会造成管道和船舶等的二次破裂。该机制可能会给燃烧提供额外燃料,并且消防给水系统可能会失效。

8.7.5.2 USFOS®结果 USFOS® Results

表 8.7 所示的 USFOS®分析结果可分 3 个区域来考虑。最后的情况还包括对东南角所选桁架构件提供被动消防(PFP)的效应。详细内容将在随后小节内讨论。

最后的计算反映了在模块支撑点下方的桁架构件应用被动消防(PFP)的情况。在一个模块支撑下有两个构件是绝缘的,而在其他支撑下只有一个构件是绝缘的。虽然这一点具有最高载荷,但不可能受到很高的火灾载荷(只有远场辐射),而第一个支撑点在许多火灾场景中将会被火焰吞没。

表 8.7 USFOS®分析的主要载荷

区 域	失效前时间/min	需喷淋	注 释
西南角	7	否	区域中的火灾规模保守
	10	是	保守火灾规模 模型略微保守
	>150	是	实际火灾规模 最乐观位置

（续表）

区　域	失效前时间/min	需喷淋	注　释
柱子顶端	16	否	使用标准火灾规模
东南角	22	是	使用实际火灾规模和热载荷进行计算
	45	是	在所选构件上采用被动消防(PFP)

8.7.6 量化风险评估建模 QRA Modelling

在量化风险评估中使用的甲板初始失效模式如图 8.9 所示。应该指出的是：

- 曲线是所有甲板和各区域的整体平均失效函数；
- 模块支撑框架构件的性能可能会在较低概率范围内。

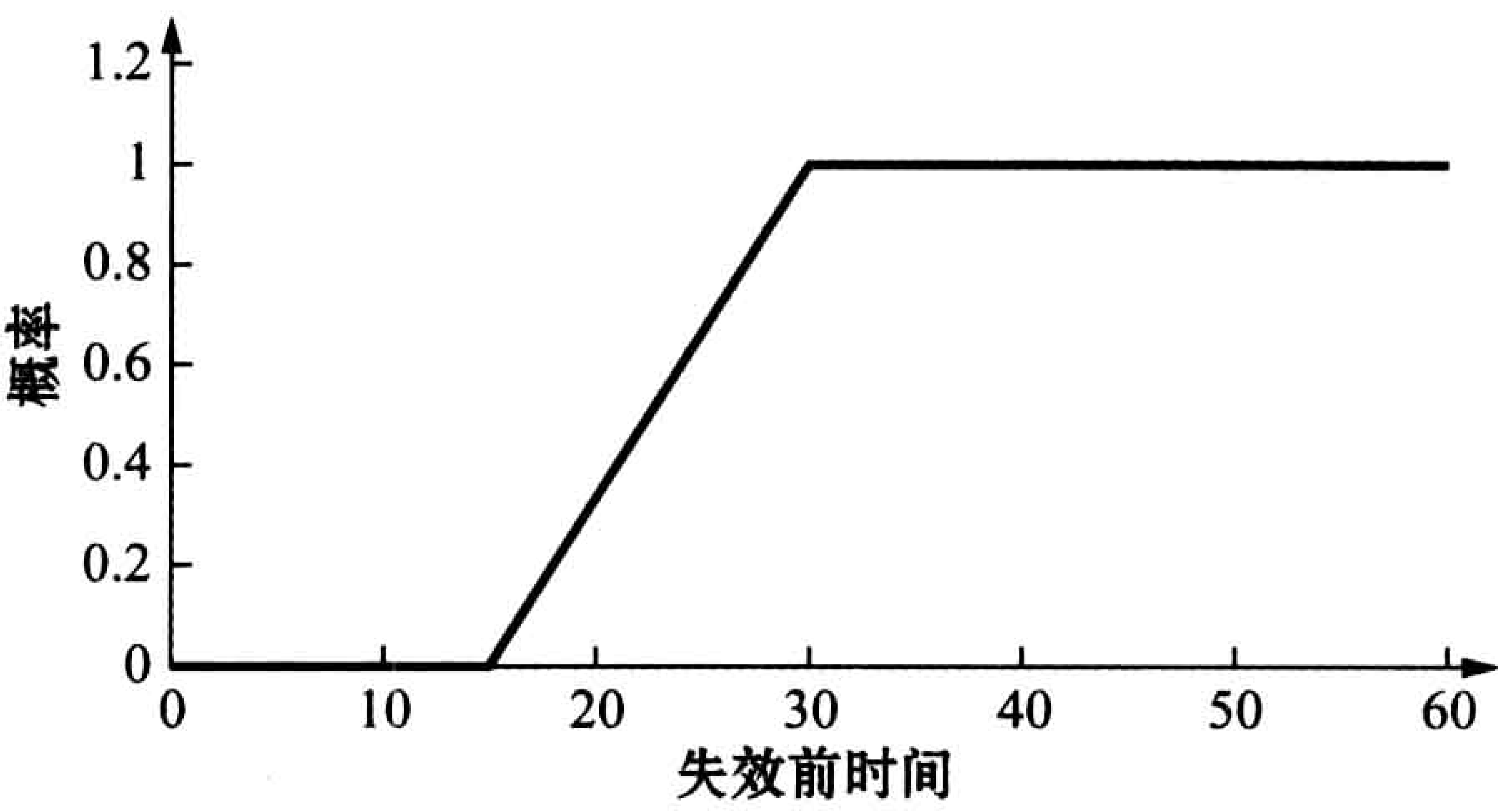


图 8.9　在量化风险评估中甲板和各区域所使用的基本案例失效概率模型

这是简单模型，在任何意义上都不需很准确，但对于量化风险评估建模却很有用。该模型的涵义如下：

- (在一定程度上提供从一个甲板至其上层甲板的火灾事态加剧)结构失效不可能达到 15min；
- 在 30min 之后火灾事态加剧至甲板失效是无疑的；
- (作为简化模型)假设在 15 和 30min 之间失效概率线性增加。

曲线的定义可以由数学方式表达如下：

$$P_f = \begin{cases} 0, & t < 15 \\ \frac{t}{15} - 1, & 15 \leqslant t \leqslant 30 \\ 1, & t > 30 \end{cases} \tag{8.9}$$

式中：

t——燃烧持续时间(min)。

关键是要注意在量化风险评估环境下所观察到的 USFOS® 研究可能有如下特点：

- 研究提供了“瞬态图”，即只提供众多可能情况下的单一确定性的计算；
- 研究提供了在给定火灾和结构载荷下的特定区域内的具体失效所需时间；
- 由于 USFOS® 研究通常是在最严重情况下最关键区域内进行，故其趋向于定义失效曲线的最低起始点。

对于涉及量化风险评估的 USFOS® 研究结果的评价，下列情况应予以注意：

- 对于最低合理可行原则（ALARP）的分析，主动和被动消防可以结合起来加以考虑，即使规范不允许计算主动消防，而被动防火已被量化。

依据 USFOS® 研究结果，在图 8.9 中的失效模式已经作了修改，如图 8.10 所示。

该失效曲线与式 8.9 所定义的相似，但失效概率在 5min 后，而不是在 15min 后，就开始上升至零以上。失效概率始终小于 1.0，直至燃烧持续时间达到 30min，此时的失效概率为 1，与以前模型相同。

最后，图 8.1 呈现了失效函数假设在最易受损区域具有被动消防保护的结构建模情况。

图 8.11 的涵义是指即使在最关键区域，结构在 20min 之内也不会失效。

在该情况下，在结构不同部件之间仅存在有限变化。

所选的这两个建模案例（在图 8.10 和图 8.11 中所表示的失效模型）显示了以保守方法来论证最低合理可行原则（ALARP），由于在区域内受到被动消防（PFP）的有限保护不可能对这两个简图所涵盖范围进行更广泛的改进，而只可能在更小范围内进行改进。

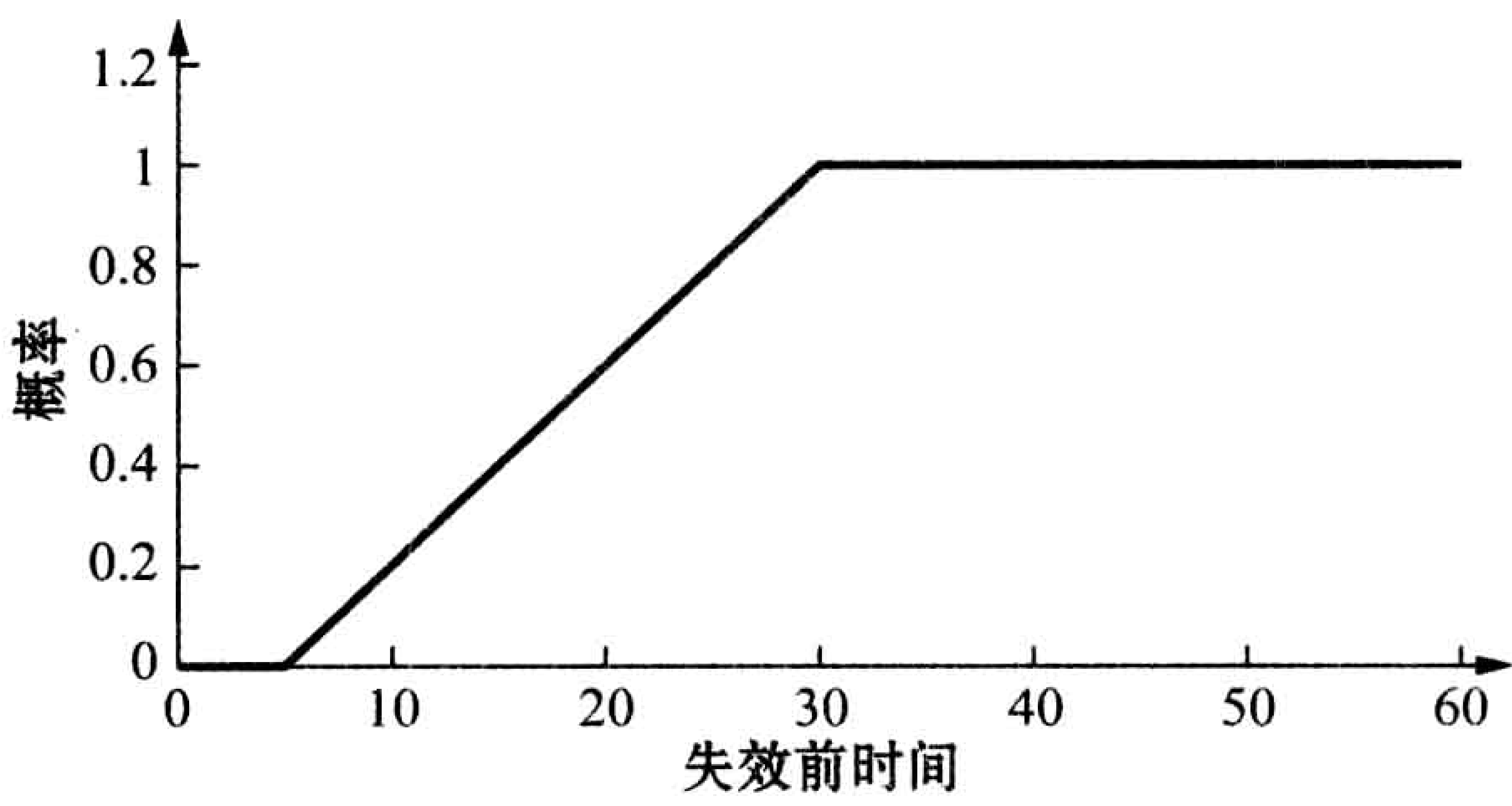


图 8.10　修改后的失效概率模型用于反映未受保护结构的脆弱性

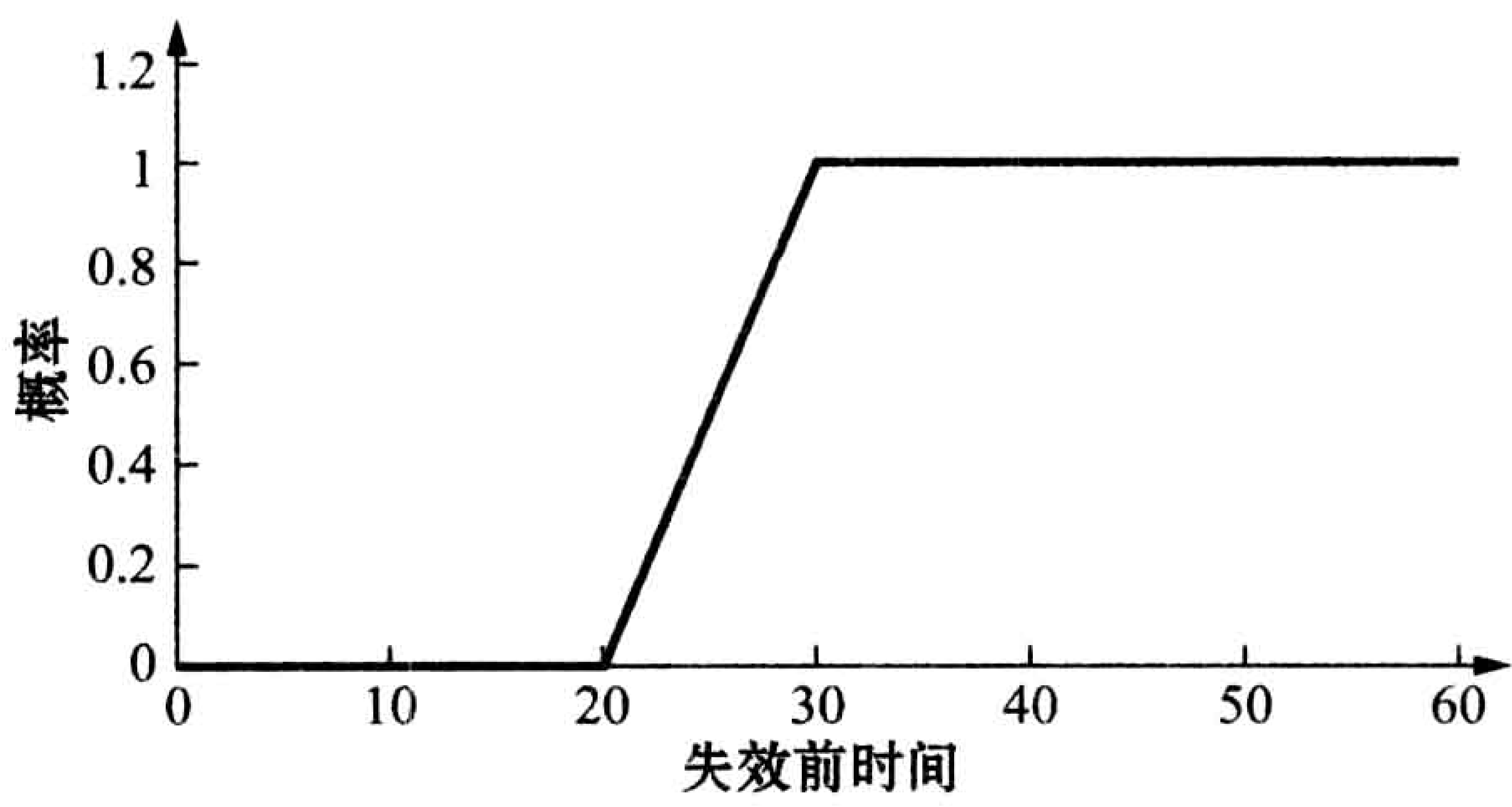


图 8.11　结构消防改进后的结构失效模型

8.7.7　量化风险评估结果 QRA Results

图 8.12 和图 8.13 所示为 4 种类型的物质损失风险对于资产的结果。

可观察到物质损失风险的影响非常小，对于重大损坏（一个模块损坏）和严重损坏（两个或多个模块损坏）的频率变化仅约为 3～4％。对此的解释如下：在结构消防有了改进后，一些早先可能导致事态加剧至第二个模块的场景被遏制在一个

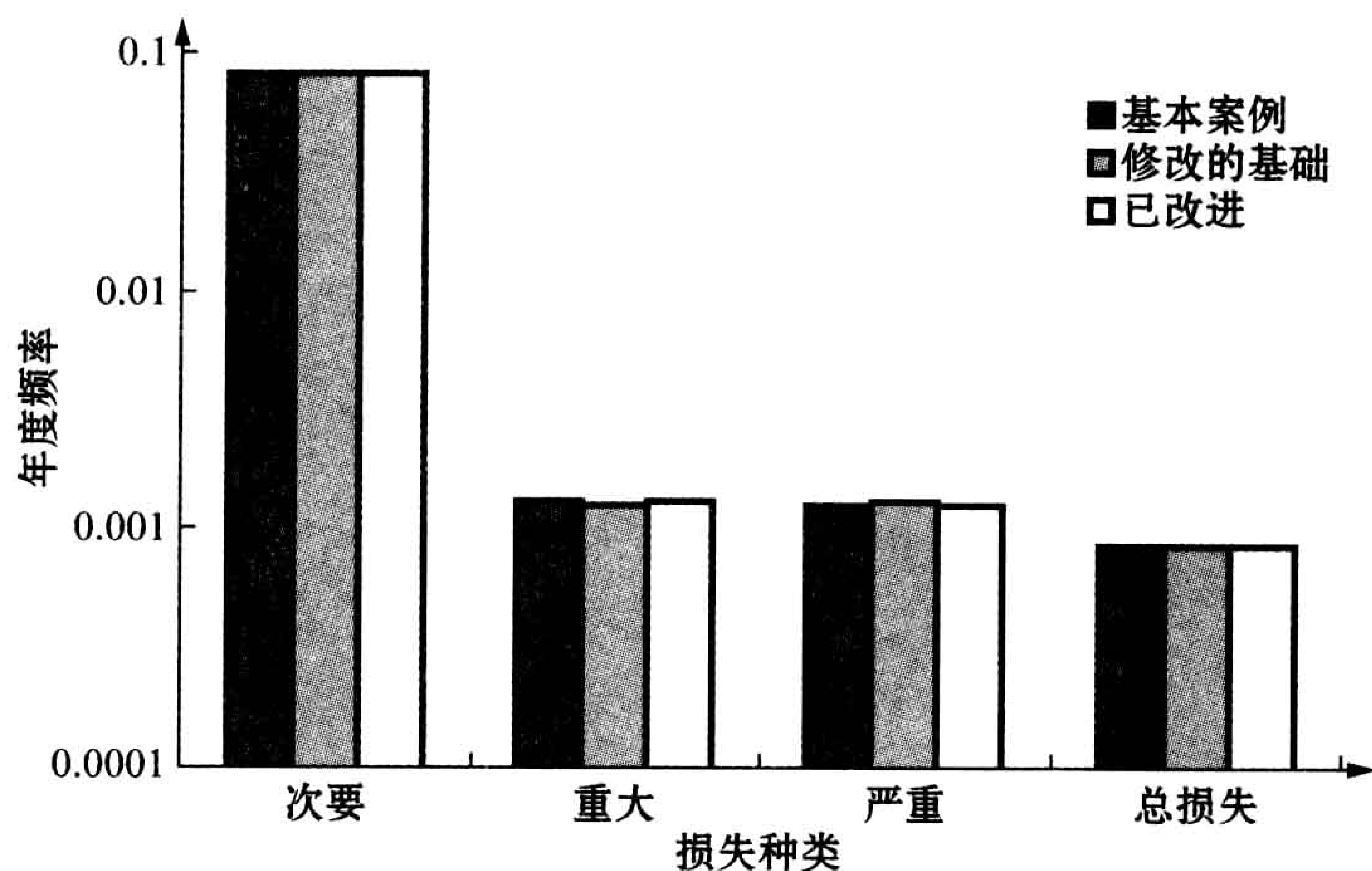


图 8.12　物质损失风险的总体结果

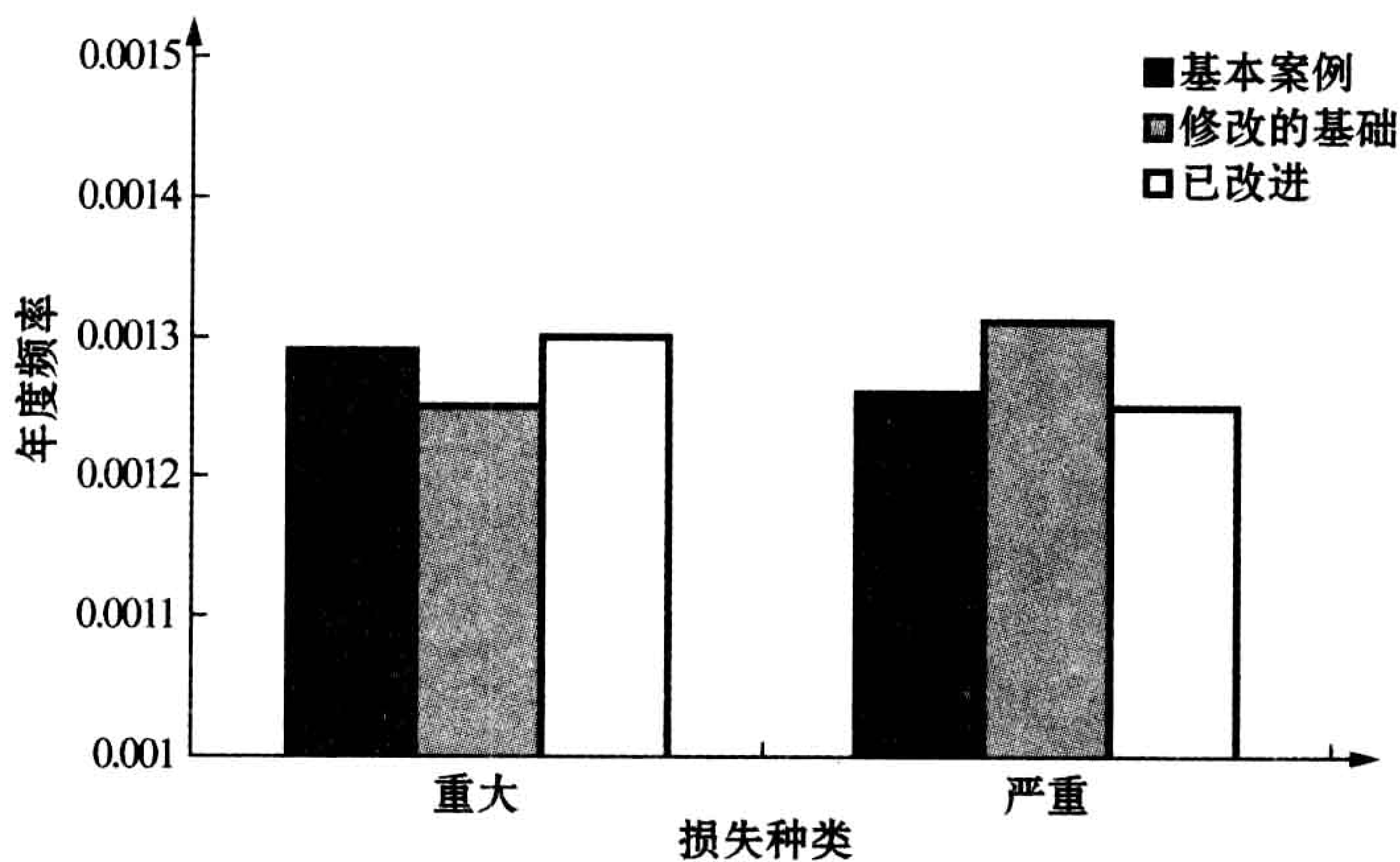


图 8.13　仅限于重大和严重损坏的物资损失结果

模块内。因此，最严重损坏的频率会降低，而最低类别的损坏就相应增加了。

8.7.8　结论

Observations

本节所讨论的案例研究已证明了使用高级非线性结构分析与量化风险评估组合的几方面问题。从该案例中可获得的主要结论如下：

- 根据具体结构构件所受到的影响，非线性分析能反映结构敏感性的差异。
- 采用 USFOS®（及相关软件工具）的分析能确定被动消防（PFP）非常有限地应用于结构构件的重大改进。因此，可以对需要改进的实际案例进行定义和实施。无论是从技术或经济角度，更广泛的被动消防（PFP）应用可能不会是切合实际的。
- 结构消防的改进对风险等级产生的有限影响主要是由于在所关注的海上设施上并没有提供生活设备。

8.8 爆炸冲击和火灾设计指南 Blast and Fire Design Guidance

钢结构协会与英国天然气公司和壳牌公司合作，并在一些赞助商的支持下，于 1992 年出版了下列文献：

- 爆炸和火灾危险环境顶边结构设计和保护暂行指南（SCI，1992）。

该指南文本已历经多年修订，第 2 版修订本也已筹备了数年。下列是在编撰时不同部分的状况（见 http://www.fireandblast.com）：

- 火灾和爆炸危险指南：第 0 部分——火灾和爆炸危险管理，2003 年 10 月第 2 期发行（UKOOA，2003）；
- 火灾和爆炸危险指南：第 1 部分——避免和减轻爆炸危险，2003 年 10 月第 1 期发行（UKOOA，2003b）；
- 火灾和爆炸危险指南：第 2 部分——避免和减轻火灾危险，2006 年 2 月最终稿出版（UKOOA，2006）。

第 9 章　爆炸风险建模

Explosion Risk Modelling

9.1 概述
Overview

9.1.1 引言
Introduction

海上设施爆炸在最近几年频频成为关注的焦点，有新的观点证明，之前对爆炸冲击载荷的认识已经过时。更糟糕的是，最新几次测试得出的爆炸冲击载荷值非常高，以致在许多设计案例中无法对它们进行规避设计。

于是以下问题自然成为了关注的焦点：现实的爆炸冲击载荷是什么样的？如何确定它们的大小？什么是最好的爆炸冲击载荷规避设计方法？

因此，爆炸冲击载荷的估算和评估就成为了本书中的重要主题。物理定律和详细的计算方法不在本书讨论范围之内，因为这些内容本身即可另成一书。本章对一些重要概念作了简单介绍。

9.1.2 针对结构的爆炸载荷
Explosion Loads on Structure

针对结构的爆炸载荷及其响应的计算方法可以借鉴火灾分析中的一系列步骤进行：

- 计算碳氢化合物的释放量；
- 计算作为时间函数的爆炸过压载荷；
- 计算时变过压载荷的结构响应；
- 评价二次爆炸冲击效应，例如飞射物等。

通过顶边结构爆炸冲击与消防工程（BFETS）研究项目（SCI，1998）进行的一系列大规模测试，爆炸建模水平目前已经得到显著提高。

这一项目让大家意识到，载荷等级很可能比之前认为的要高得多。

9.1.3 针对人员的爆炸载荷 Explosion Loads on People

对针对人员的爆炸载荷效果的评估与针对结构的效果分析类似，然而在某些方面针对人员的效果评估要简单许多。一些指示性载荷参见第 7.3.3 节的介绍。

9.2 爆炸频率 Explosion Frequency

9.2.1 事件树分析 Event Tree Analysis

通常情况下，爆炸事件的发生频率可以通过对量化风险评估(QRA)研究中的事件树分析的估计得出。参照图 9.1，它与第 5 章使用的图一样，用于说明生产泄漏后的简单事件树。图 9.1 中的条件表示爆炸发生的几率，假定在一个中等气体泄漏情况下，条件如下：

- 应急切断(ESD)失败，模块内起火；
- 应急切断(ESD)成功，模块内起火。

简单事件树假设，所有的气体泄漏起火后都将引发爆炸。而详细事件树将明确区分起火将引发一次爆炸或者仅仅是火灾。

对事件树中事件频率的计算将建立在所有爆炸案例的爆炸频率基础之上，而不会考虑与之相关的爆炸冲击载荷。

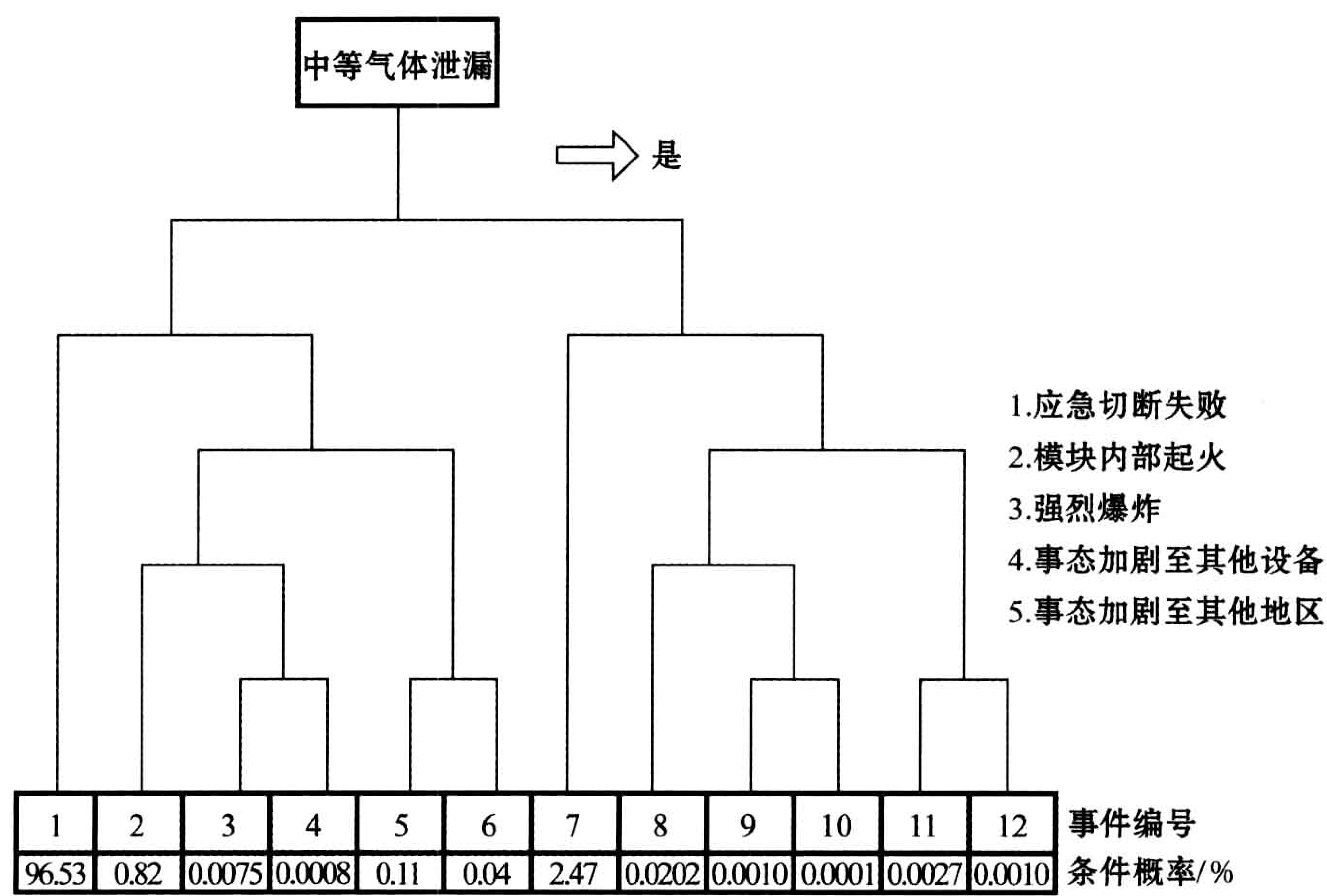


图 9.1　中等气体泄漏的事件树

9.2.2　历史发生频率 Historical Frequencies

曾有一项研究(Vinnem，1998)对 1973～1997 年这 25 年间在以下地理区域内的潜在爆炸进行分析,这些区域包括：

- 挪威区域：

  北海；

  挪威海。
- 英国区域：

  北海；

  爱尔兰海；

  大西洋(设德兰群岛以西)。
- 荷兰区域：

  北海。
- 丹麦区域：

北海。

英国和挪威区域的爆炸数据均有记录。在丹麦区域，1977 年曾发生了一起由钻井井喷引发的爆炸事故，但是移动式钻井平台不在此研究参考资料的范围内。在此研究结束后，2001 年还出现过一起发生在海上生产设施上的重大爆炸事故。

在荷兰区域中，WOAD®数据库中没有任何固定海上设施或浮式海上设施的爆炸记录。然而，在 1995 年，有多则报道宣称荷兰发生过一起事故，一个热油加热系统在一处开放场地着火引发了一起小型爆炸事故。这起事故造成了损失较为轻微，但具体细节无从得知，这起事故甚至没有记录在 WOAD®或劳氏日报的数据库中。可以确定的是已经发生火灾，但由于缺乏消息来源，在火灾之前的爆炸并没有被证实。保守估计，这可能是一起爆炸事故，但过压较低。

在这 25 年间，在相关区域发生了 34 起相关的爆炸事故。以下是这些事故的分布情况。

- 英国：16　　起事故；
- 挪威：17　　起事故；
- 荷兰：1　　起事故；
- 丹麦：0　　起事故。

在挪威以外的区域，很可能有一定数量的爆炸事故没有被记录，因为 WOAD®数据库同挪威官方机构的合作比同英国、荷兰和丹麦等国家更紧密一些。

9.2.2.1　爆破冲击载荷分类 Blast Load Categorisation

以下分类方法可用于过压分类：

- ＜0.2bar；
- 0.2～1bar；
- 1～2bar；
- ＞2bar。

其他与气体爆炸响应有关、可能需要进行评估的因素包括：

- 与镶板上平均最大过压相关的局部最大值；
- 压力峰值的持续时间。

这两个因素均对响应和效果的评估起着重要的作用，但是如果要允许有诸如此类的考虑因素，这些描述又显得过于模糊(即使在咨询企业之后)。

9.2.2.2 爆炸冲击频次 Blast Occurrences

表 9.1 是对此 25 年间发生的 34 次已鉴别爆炸冲击事故的一个概述，同时对不同假设情况下的可适用性进行了评估。可以看出，在过去的这些年间，相关改进非常明显，包括：

- 所有发生过重大爆炸事故的海上设施均为 1980 年之前的离岸设施；
- 如果对比“旧”海上设施(1980 年之前)和“新”海上设施(1980 年之后)各自发生的小型爆炸事故(< 0.2bar)，事故比率大约是 2∶1；
- 随着时间的推移，每年“旧”海上设施发生的爆炸事故数量下降趋势明显。这种趋势同时体现在重大爆炸事故和小型爆炸事故上(例如，大于和小于 0.2bar)。

可以这样认为，根据此 25 年间所有涉及的海上设施得出结论的做法相当保守。同时已做出整体频率的调整。本报告中也给出了未经调整的数值。

同时还对挪威和英国的海上设施进行了对比，但是由于数量太小，无法推导出可靠结论。

9.2.2.3 估计的频率 Estimated Frequencies

发生频率可以根据“每平台年”估计得出，也可以根据“每爆炸区域年”估计得出。图 9.2 所示仅为爆炸区域结果，同时还给出了调整后的超标频率。这些频率基于不同的数据解读方式，其中只有跟常规操作相关的事件采用同一种方式解读，而其他事件则采用另外的方式解读。此外，图中还给出了 50%的预测

上限，其依据仅为所谓的“相关事件”。后续超标频率图采用过压范围的下限作为绘图基准。

已经考虑到调整后的频率带有一定程度的保守性。所以在报告（Vinnem，1998）中推荐使用 50%的预测上限，可以同量化风险评估得出的预测上限进行对比。爆炸屏障失效和事态加剧的计算所得频率如下：

表 9.1　爆炸冲击载荷分类概述

划分区域/设定情形		过压分类/bar			
		＜0. 2	0. 2～1	1～2	＞2
英国区域	● 所有事件类型	7	7	2	0
	● 所有事件类型，但不含在维护过程中关闭设备时出现的事件	7	6	1	0
	● 所有事件类型，但不含维护过程中关闭设备时出现的事件以及无关的非代表性事件	7	6	1	0
	● 所有事件类型，但不含维护过程中关闭设备时出现的事件以及分类区域以外起火的事件	7	5	1	0
挪威区域	● 所有事件类型	16	1	0	0
	● 所有事件类型，但不含在维护过程中关闭设备时出现的事件	16	1	0	0
	● 所有事件类型，但不含维护过程中关闭设备时出现的事件以及无关的非代表性事件	15	1	0	0
荷兰区域		1	0	0	0
丹麦区域		0	0	0	0
所有区域总计	● 所有事件类型	24	8	2	0
	● 所有事件类型，但不含在维护过程中关闭设备时出现的事件	24	7	1	0
	● 所有事件类型，但不含维护过程中关闭设备时出现的事件以及无关的非代表性事件	23	7	1	0
	● 所有事件类型，但不含维护过程中关闭设备时出现的事件以及分类区域以外起火的事件	23	6	1	0
	○ 爆炸屏障失效的频率：	5.7×10^{-5} 每爆炸区域年			
	○ 事态加剧的频率：	2.9×10^{-5} 每爆炸区域年			

以上数值均基于常规生产相关事件，在解读损失相关的数据时采用了保守方式。

9.3 爆炸后果分析 Explosion Consequence Analysis

9.3.1 爆炸载荷的类型 Types of Explosion Loads

爆炸载荷范围从低于 100mbar 过压到数值达多个单位的过压。载荷可能对结构产生以下影响：

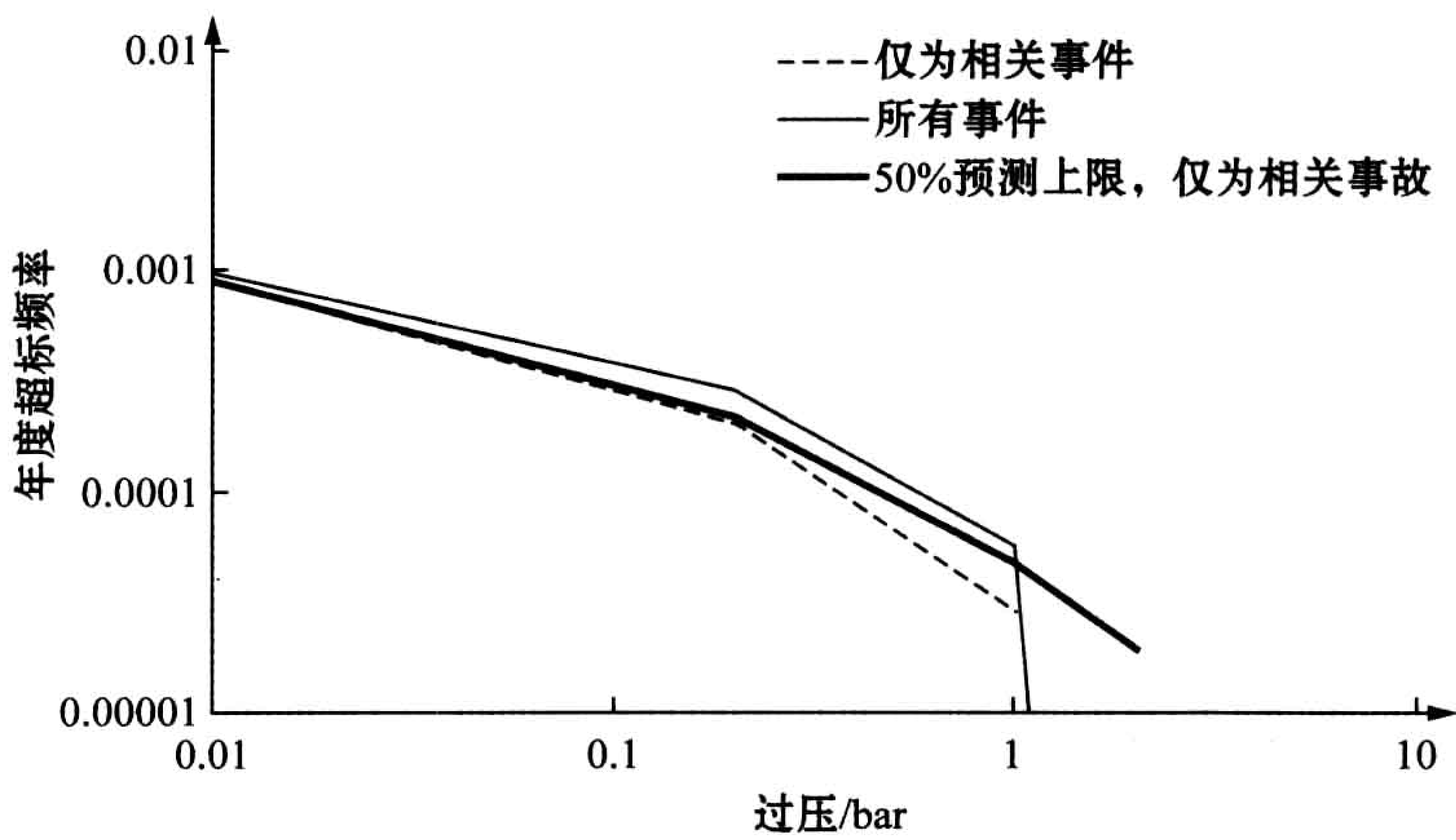


图 9.2 每个爆炸区域的超标频率

- 直接灾难性故障；
- （对三级结构的）重大破损，可能因后续火灾进一步恶化；
- （结构上）几乎没有或完全没有任何破损，但是导致安全系统的严重故障，从而无法控制后续火灾；
- 损坏被动消防设备，从而降低结构内成员的生还可能性；

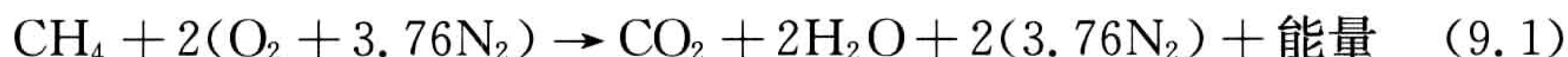
● 损坏生产设备，从而立刻造成事态加剧。

值得注意的是，帕玻尔·阿尔法平台事故属于最后一种类型。第一种类型的事故几乎不会发生在海上设施上，但是陆上的石化和化工工厂曾发生过此类事故。最广为人知的此类事故当属 1974 年发生在英国的弗利克斯巴勒化工厂爆炸事故。

这一现象有好几种名称："气体爆炸"、"气态爆炸"、"非密闭蒸气云爆炸"、"蒸气云爆炸"或"油气爆炸"。在下文中统一采用"气体爆炸"表示。

爆炸被定义为一种导致压力迅速增大的现象。有很多不同的原因可能导致压力增大，如核反应、高压船舶内空间的减小、烈性炸药、液化金属蒸气爆炸、失控反应、粉尘燃烧、空气或其他氧化剂中的雾状物或气体(包括蒸气)等。

在气体、液体或固体的燃烧过程中，燃料被氧化，通常会释放出热能和光能。甲烷在空气中燃烧的现象可以用下述化学方程式描述：



$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 2(3.76N_2) + \text{能量} \quad (9.1)$$

碳氢化合物燃料完全燃烧生成的化合物主要是二氧化碳和水。燃烧过程中，由于将其中的化学能转化成热能，所以会导致温度升高。必须强调的是，上述方程式对现实中的燃烧过程做了极大的简化处理。

空气中气态燃料的燃烧可能有两种不同的模式。最常见的模式是着火。如果燃料和氧气在燃烧过程中混合在一起，就会出现着火现象。另外一种情况是燃料和空气(或其他氧化剂)在燃烧之前就已经混合，且燃料的浓度在足够引起燃烧的可燃范围内。通常而言，燃料和空气先进行混合可以让燃料燃烧得更快一些，即在每单位时间内消耗更多的燃料。如果先混合的燃料在形成任何规模的气体云之前就已经被点燃，那么也可能以着火的形式燃烧。

9.3.2　气体爆炸
Gas Explosion

气体爆炸是指预先混合的气体云(即油气)燃烧引起压力急剧增大的过程。气体爆炸可能发生在生产设备内部或管道内、建筑物内或离岸模块内、开放式生产区或其他非密闭区域。

气体爆炸引发的后果取决于含有气体云或被气体云所包围的环境。因此，我们很自然地根据爆炸发生的环境对气体爆炸进行分类。通常而言，分为 3 类爆炸：

- 在船舶、管道、通道或隧道内的密闭气体爆炸；
- 在隔舱、建筑物或离岸模块内的部分密闭气体爆炸；
- 在生产厂或其他非密闭区域内的非密闭气体爆炸。

应该指出，这些分类并不精确，而且在一场事故当中可能也很难区分爆炸属于哪种类别。举例而言，在生产厂的非密闭爆炸中，如果气体云发生泄漏，那么很可能同时包含了隔舱的部分密闭爆炸。

密闭气体爆炸是指发生在罐、生产设备、管道、下水道、污水管道、密闭房间和地底设施中的爆炸。密闭爆炸也被称为内部爆炸。

这种爆炸方式的典型特性是燃烧过程不一定需要非常快速，以积累足够大的压力。

当燃料在一个部分开放的建筑物内燃烧时，就会发生部分密闭爆炸。典型的场所包括压缩机房和离岸模块。建筑物将限制爆炸范围，爆炸压力只能通过爆炸的排气口（如墙体上的开口或低过压出现时迅速打开的轻质排气墙）进行释放来降低，或通过四周围绕物的失效来降低。

术语“非密闭气体爆炸”用于描述发生在空旷区域的爆炸，如生产厂中。大量的测试表明，一个被微弱的起火源点燃的完全非密闭、无阻隔的气体云，在燃烧（可见闪烁的火苗）过程中仅产生低过压。一个生产厂内包含有部分密闭和阻隔的区域。在爆燃案例中，正是这些区域导致极高的爆炸压力。爆燃的燃烧速度有限，在 100～500m/s 范围内。

然而，如果一个非密闭气体云被引爆，将产生极高的爆炸压力，大约在 20bar 左右，与密闭和阻隔爆炸截然不同。爆炸波波前像激波前沿一样传递，紧跟着一个燃烧波。爆炸波阵面的速度可以达到发热物中的音速大小，远高于在未燃烧的混合物中的速度。爆炸波阵面的传播速率可能会达到 2 000～3 000m/s。

9.3.3 冲击波 Blast Wave

冲击波可以定义为爆炸引起的运动空气波。术语“冲击波”包含声音压缩

波、震荡波和稀疏波。图 9.3 显示了不同的基本冲击波类型。类型包括：

- 震荡波，后面跟着一个稀疏波；
- 震荡波，后面跟着一个声音压缩波，然后再跟着一个稀疏波；
- 声音压缩波，后面跟着一个稀疏波。

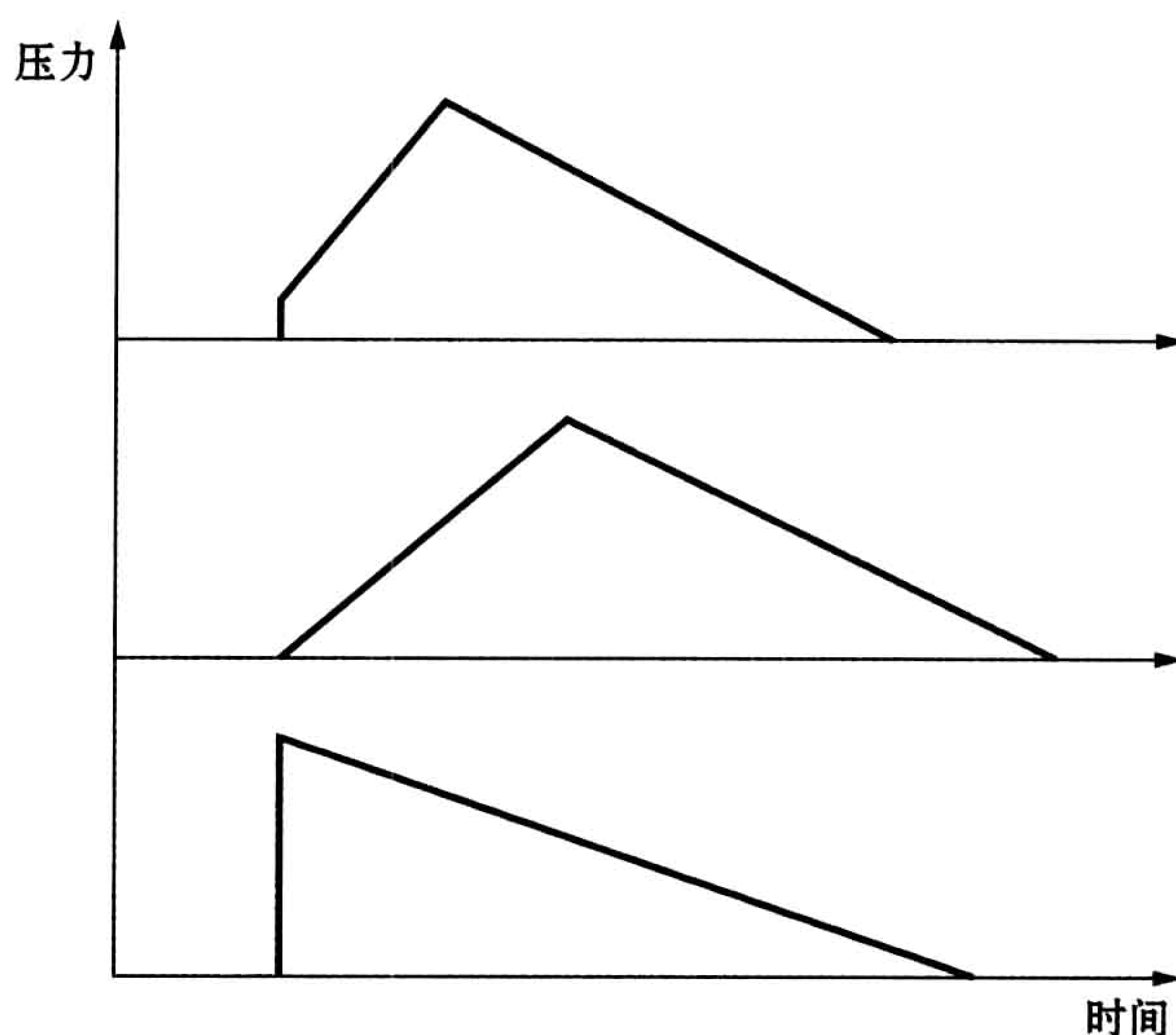


图 9.3　冲击波类型

冲击波类型取决于爆炸能量如何以及何时释放，另外也和离爆炸区域的距离有关。第 1 类爆炸为典型的强烈爆炸。微弱的爆炸最初一般归类为第 3 类爆炸，但是冲击波离开爆炸区域后，也可能会“上冲”，并以第 1 类结束。

9.3.4　压力
Pressure

压力是在所有方向均匀施加的一种力，以单位面积上所施加的力来度量。在流体动力学中，我们经常使用像静态压力、动态压力和驻点压力等术语。静态压力则是我们通常所说的压力。

动态压力是指流体在压力梯度的作用下形成的等熵流动最终停止时所增

加的压力。动态压力也可以表示为流动速率 u 和密度 ρ 的关系式：

$$P_{\text{Dyn}} = \frac{\rho \cdot u^2}{3} \tag{9.2}$$

驻点压力是指流体在压力梯度的作用下形成的等熵流动最终停止时的压力。驻点压力是静态压力和动态压力的总和。

$$P_{\text{Stag}} = P_{\text{Stat}} + P_{\text{Dyn}} \tag{9.3}$$

对于冲击波和激波，我们使用两个术语“侧边压力”和“反射压力”。侧边压力是指垂直于行波方向所测得的压力。其大小等于震荡波之后的静态压力。反射压力是指当行波正面撞上物体时（如墙）所测得的压力。由于反射并非一种等熵过程，因此驻点压力和反射压力有所区别。侧边压力和反射压力的定义如图 9.4 所示。

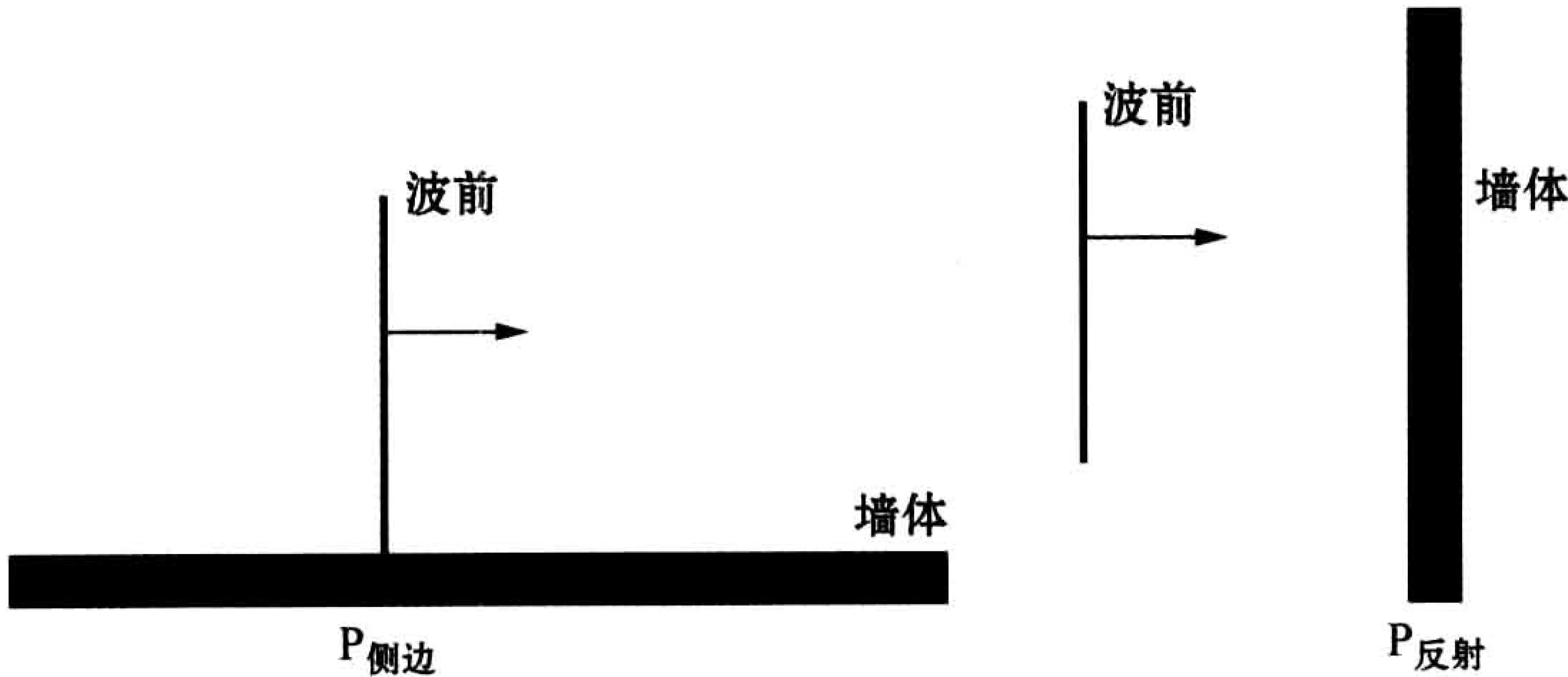


图 9.4　侧边压力和反射压力

9.3.5　爆炸云的形成 Formation of Explosive Cloud

如果释放出的气体云在可燃浓度之外（即不在爆炸下限和爆炸上限之间），或者没有起火源时，将不会发生燃烧现象。随后气体云也将逐渐变得稀薄并最终消失。在立即起火的情况下，将会形成火灾。然而，如果形成了大范围的可

燃混合油气云并且将其点燃,将发生最危险的情况。可能会发生严重的爆炸。

9.3.5.1 喷式释放和蒸发池 Jet Release and Evaporating Pool

释放物可以是气体、蒸发溶液,或者是气液(双态)流。释放源特征可为喷射释放(即气体或双态)或蒸发溶液,或是扩散释放(即蒸发池)。

这两种释放源的特性大相径庭。由于额外的空气吸入,喷射释放的动量高,并可形成一个强大的流场。同时还可能生成絮流区,其中的气体浓度可达到爆炸云级别。蒸发池则像是一个扩散释放源,风力和浮力主导了整个散布过程。其流速比喷射释放要低得多。如果蒸发溶液形成了稠密气体,在地平面或底层隔舱将形成一层爆炸云。同样,在空旷区域的稠密气体也有侵入建筑物等密闭空间的可能,在高过压的作用下可能会引发严重的问题。

9.3.5.2 气体云和起火 Gas Cloud and Ignition

若要使气体云起火,需要有一个足够强度的起火源。最低起火能量取决于燃料浓度和燃料类型(见图 9.5)。当浓度接近于化学计量混合物时,能量最低。图中曲线说明了这个原理,图例中未给出单位。

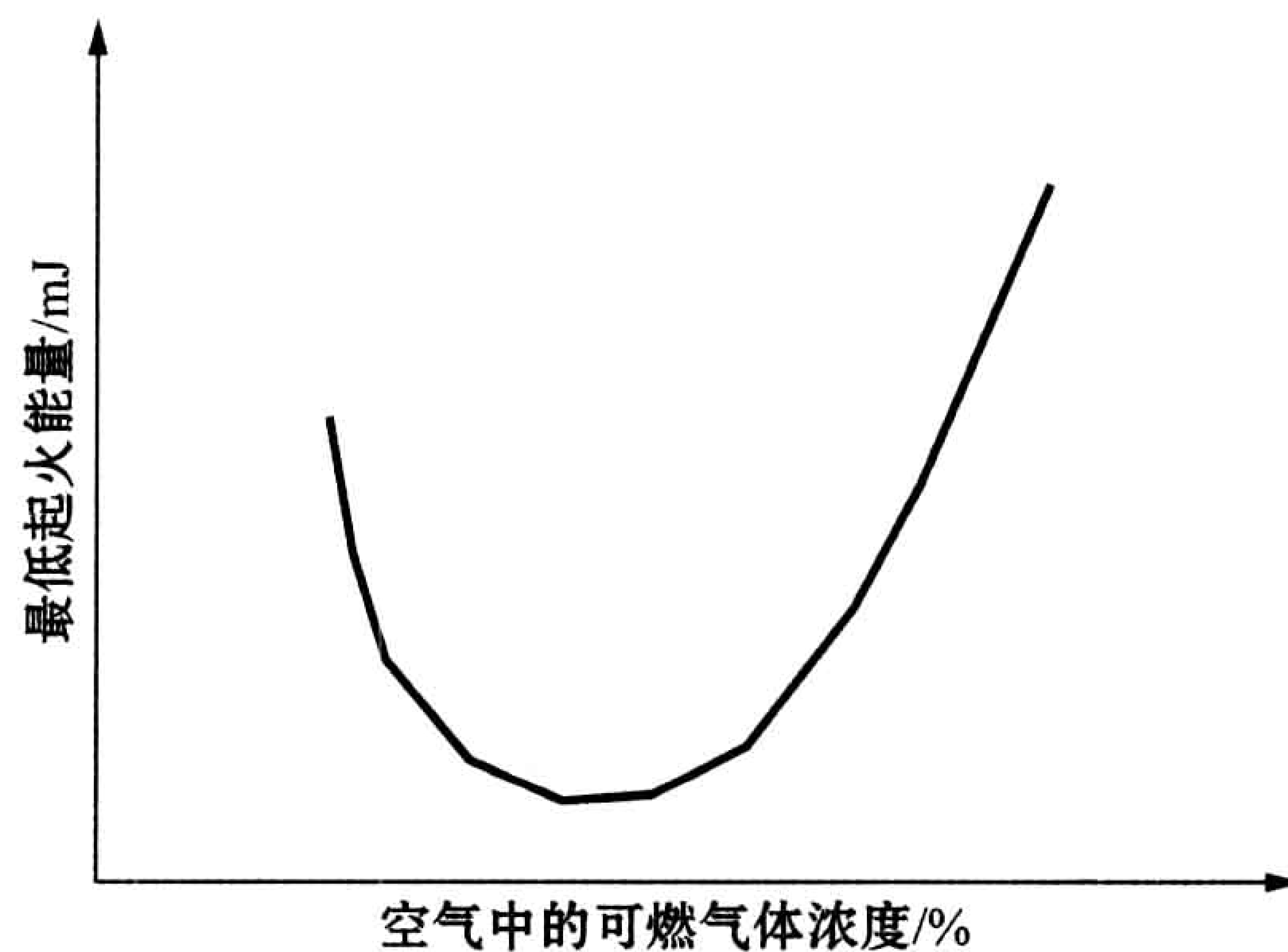


图 9.5 最低起火能量

当泄漏源流空时,释放速率将逐渐变缓,气体云中的气体浓度也将逐渐降低。微弱的起火源将一直处于“等待”状态,直到气体云在被点燃前达到理想的

成分比例。在几起意外气体爆炸事故中，从释放到爆炸的时间间隔均在 10～20min。在这些事故中，很可能（仅为推测）气体浓度在起火时就一直处于降低状态。

当起火源强度足够时，气体云将在云的边缘碰到起火源之后被点燃。然而，如果起火源比较微弱，起火源可能无法在散布过程的早期点燃气体云，或仅能点燃一小部分气体云。随后，大面积的同质气体云可能将形成。当累积的压力释放后，气体云将达到可燃浓度，此时微弱的起火源即可将气体云点燃。以上讨论说明了在评估起火概率和爆炸气体云形成过程中的一些复杂情形。

9.3.5.3 隔舱通风 Ventilation of Compartment

有一种观点认为“没有墙的建筑物是最好的建筑物”。如果从气体爆炸的安全角度考虑，这个观点十分正确。在一个开放的建筑物中，自然通风有助于气体散布，即便发生了爆炸，压力也会通过空旷的区域释放而消散。如果释放速率很低，毫无疑问需要一个机械通风系统来应对爆炸气体云的形成。然而，被动通风速率在遇到大规模的释放量时通常就显得过低了。

通风系统还可以将气体从一个区域传送到另一个区域。1985 年，这种情况曾发生在 MODU 移动式离岸钻井平台（MODU）“西部前卫”号上（参见第 4.4 节）。当时，浅层气阱井中的气体从平台底部爆出之后，又被通风系统吸入并“分布”到平台各处。随后的气体爆炸也沿着通风导管进行。

9.3.6 爆燃 Deflagration

9.3.6.1 爆燃波和爆炸压力 Deflagration Waves and Explosion Pressure

爆燃是指在压力波前方的火焰锋以亚音速（相对于未点燃气体）传播的气体爆炸。在一次气体爆炸中，传播速率的大小可以横跨 3 个数量级。以不同速率传播的火焰，其机理也大不相同。

如果气体云被一个微弱的起火源点燃（如火花或热表面），起初的火焰是一种层流焰。层流焰传播的基本原理是热与质量分子扩散。热与质量扩散进入

未点燃气体的过程相对比较缓慢，火焰约以 3～4m/s 的速率传播。层流焰的传播速率取决于燃料类型和燃料浓度。

由于火焰锋前方的流场变得不稳定，所以在大多数爆炸事故中，层流焰会加速并最终进入急速的爆燃状态(即湍流焰)。湍流焰是由于流场同生产设备、管道、结构等互相作用引起。火焰锋前方的湍流的形成机理讨论如下。

引起急速爆燃中燃烧速率增加的一个机理是较大急速涡流使得火焰锋起皱。在这种燃烧状态下，增加的火焰曲面区域将加快燃烧速率。

当火焰穿过混合后的气体云时，两种机理将导致压力积累。它们是：

1) 快速的火焰传播；
2) 在密闭的空间内燃烧。

在大多数意外爆炸事故中，压力积累都是由这两种效应同时作用引起。火焰后方的压力(在燃烧气体中)将随着远离火焰的距离而逐渐衰减。压力衰减主要取决于管口末端的边界条件(即是开放管还是闭合管)和火焰速率。

由于火焰锋是一个亚音速的燃烧波，燃烧过程将会影响火焰前方的焰流。火焰前方的压力取决于火焰的加速度和速度。只有火焰速度非常高时，火焰前方才会产生激波。

如果爆炸发生在一个密闭船舶内部，此时并不需要高速的火焰传播就能产生足够高的压力。密闭船舶中的化学计量油气云在爆炸时会产生 8～9bar 大小的压力。如果打开船舶墙体的部分面积，将进行释放，压力也会降低。降低量主要取决于火焰在船舶中以多快的速度燃烧以及通风区域的位置和大小。

9.3.6.2 因通道中障碍物重叠引起火焰加速 Flame Acceleration in a Channel Due to Repeated Obstacles

在含障碍物的部分密闭区域(即生产设备、管道等)中，气体爆炸时火焰的传播速度可能会达到几百米每秒。急速爆燃中引起燃烧速率增加的原因是较大急速涡流使得火焰锋起皱，同时反应前沿的热与质量被急速传送。湍流主要是由阻挡物(如结构、管架等)和气流的相互作用引起。

图 9.6 说明了通道中湍流如何在障碍物的尾流中产生。当火焰消耗未燃烧的气体时，产生物的体积膨胀。体积可膨胀至初始值的 8～9 倍。因此

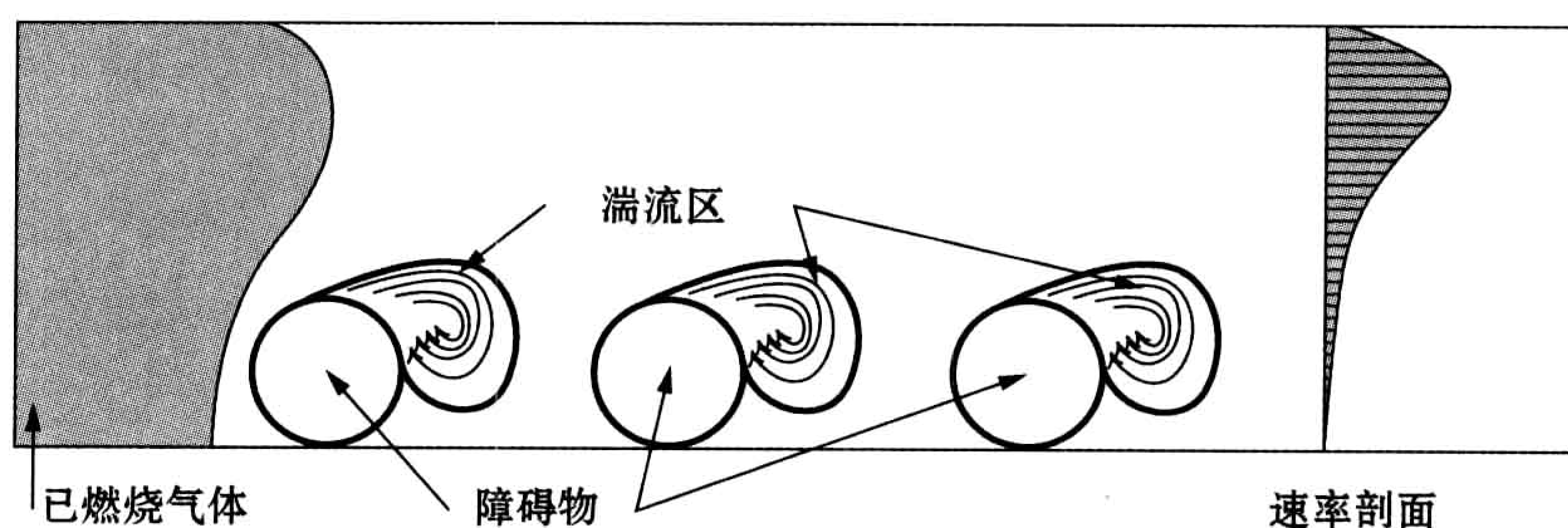


图 9.6 气体爆炸过程中因通道中障碍物重叠引起湍流形成

未燃烧的气体被推到火焰前方,之后形成一个湍流场。当火焰传播进入湍流场时,燃烧速率将急速增加。增加的燃烧速率会进一步增加流速和火焰前方的湍流。

由于障碍物的压力所引发的火焰加速引起湍流,这个机制形成一个强烈的正反馈环。某种程度上,可以通过对热燃烧产物进行通风来避免产生火焰加速。火焰前方的未燃烧混合物的流速和湍流都将得到降低。若要最小化障碍物群的加速效果,对燃烧产物进行通风是一个非常有效的方法。

对火焰前方的未燃烧气体进行通风,也会降低爆炸压力,尤其是通风直接使得气流绕开障碍物时。如果未燃烧气体在通风之前经过一连串的障碍物,就很有可能引发火焰加速。这将在本章后文部分进行阐述(见图 9.9)。

本节的讨论说明有两种机理决定部分密闭气体云爆燃时的压力积累,即:

- 障碍物引发的湍流导致加速燃烧,进而导致火焰加速;
- 通过通风降低压力从而减弱反馈机制的影响。

这两种机理的效果正好相反。湍流引起的火焰加速会增加爆炸压力,而通风则会降低压力。正是这两种效果的平衡决定了压力积累。当分析气体爆炸时,我们必须将这两种效果都考虑在内。

9.3.7 密闭/半密闭爆炸 Confined/Semi-confined Explosion

房间、离岸模块等场所的爆炸所造成的冲击波大小很难计算,因此,人们开展了几个研究项目,试图寻找出可在此类爆炸中适用的计算模型。

冲击波会受到房间内设备等的影响，但这种影响很难量化。然而，仍然有可能通过合理放置设备或其他障碍物以降低最大过压。这些措施必须在计划阶段实施完毕。重要原则现列举如下：

- 通风区域必须离潜在的起火源越近越好；
- 大多数情况下概率最高的起火源是明确的，因此在这个区域的墙上必须配备尽可能多的通风设备；
- 如果以上措施无法实施，避免只在面积最小的墙上配备通风设备；
- 如果以上措施无法实施，则将潜在的起火源放置在接近开口的位置；
- 避免使用只在两端有开口且又长又窄的房间开口（如大炮）。如果必须使用这种几何空间，则至少在其中一面侧墙的全长范围内配置通风区域。

这些原则也可以参见图 9.7。房间中的所有设备都会产生湍流，增加气体的燃烧速率，进而增加过压。

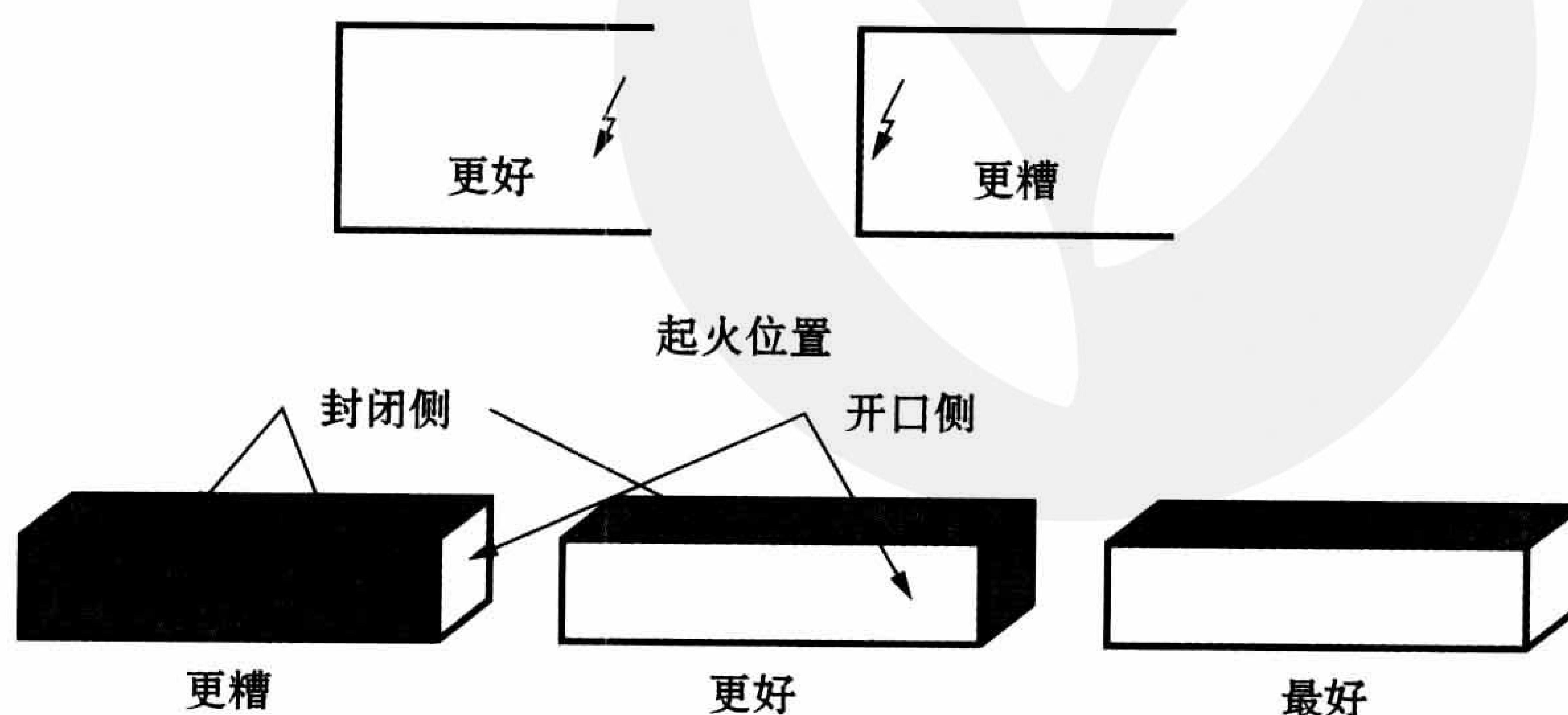


图 9.7　放置潜在起火源和通风区域

应遵循以下原则以降低最大过压：

- 放置设备和通风区域时，尽量将起火源放置于最大设备和通风区域之间；
- 最大设备的位置应当离通风区域越远越好；
- 设备的长侧边应当和通风方向平行；
- 线条分明的设备比线条圆滑的设备所引发的效果要差；
- 增大设备在通风方向上的横截面将造成过压成指数式增加。

这些原理也可参见图 9.8 和图 9.9。

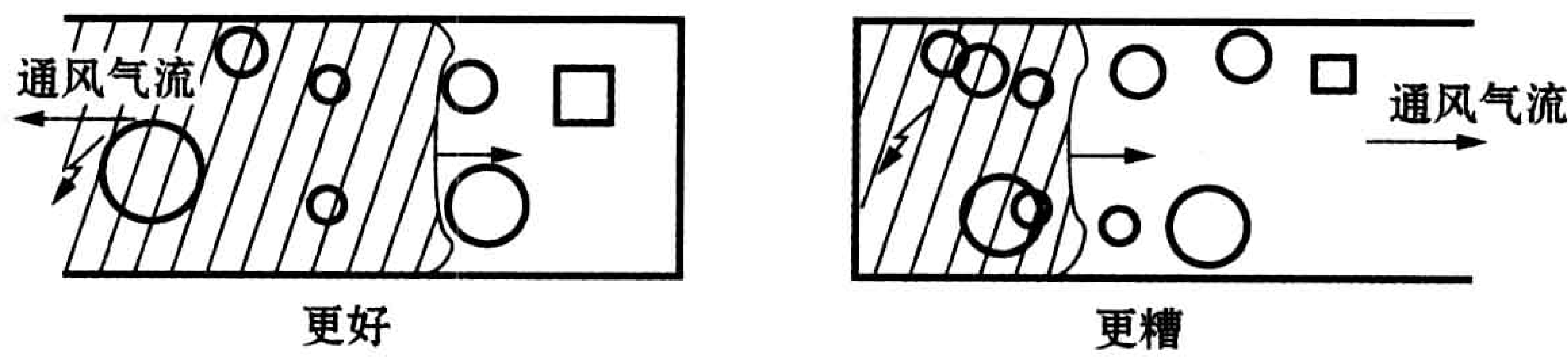


图 9.8 放置起火源

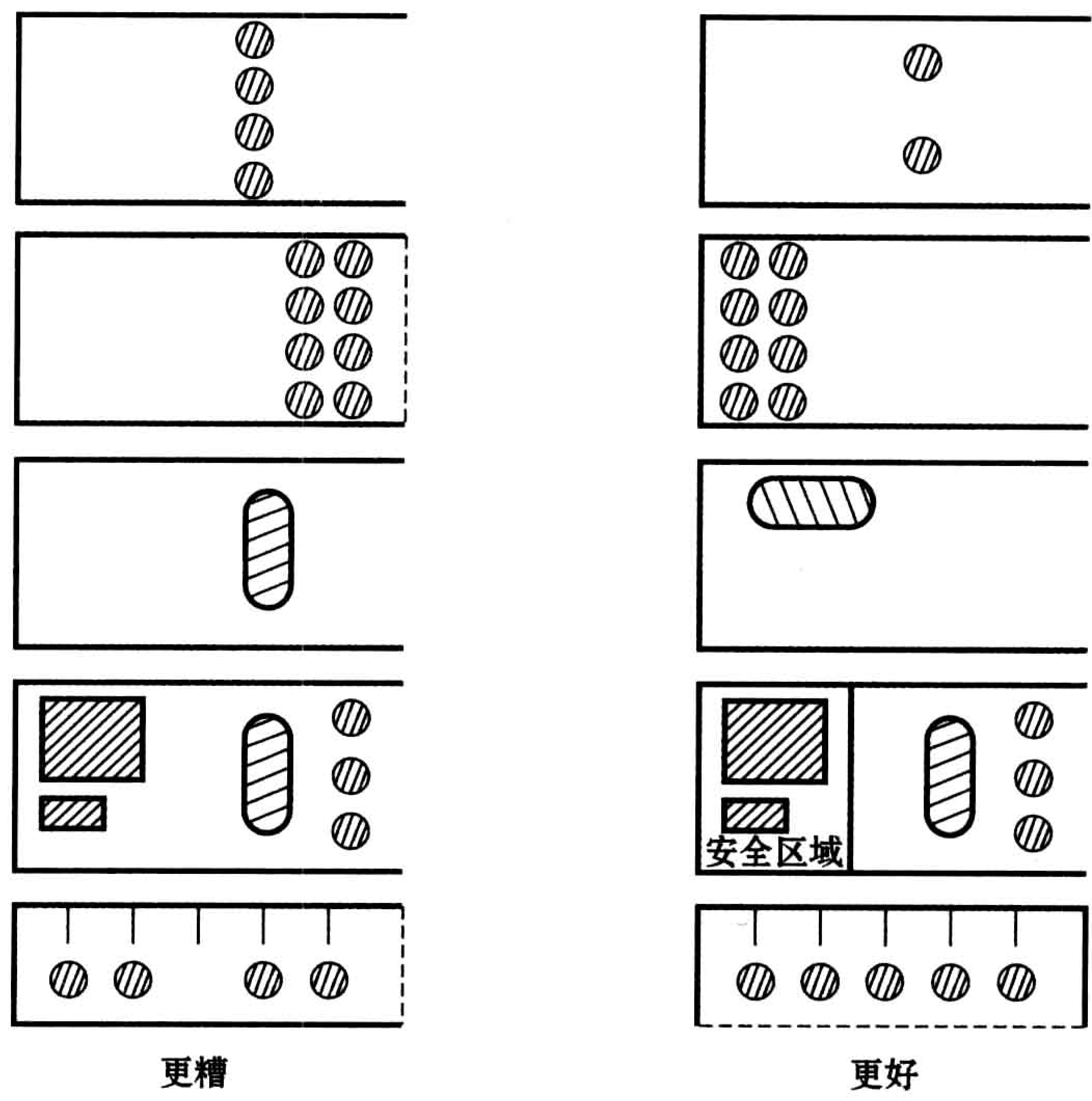


图 9.9 设备布局

设备和结构元素将在过压阶段之后承受由冲击波波前之后的瞬态风导致的动力载荷。在通风区域附近的拉力将达到最大，这对结构元素（如支柱、横梁）通常是极大的考验。在远离开口处的拉力则要小得多。

9.4 爆炸载荷评估的概率方法 Probabilistic Approach to Explosion Load Assessment

9.4.1 基础 Basis

在设计应对爆炸冲击载荷时，必须确定计算爆炸冲击载荷的大小。这通常基于概率分布。对设计载荷进行评估，意味着必须对每个待设计的结构元素建立一个超标函数。超标函数可定义如下：

超过特定过压载荷值的年均频率，是一个跟过压水平有关的函数。

超标函数根据爆炸载荷评估中的不确定性建立。这些不确定性同以下因素有关：

- 起火点的实际位置，可能性有多种，这对所引起的爆炸过压影响巨大；
- 起火源的强度，可能性也有多种，取决起火源的类型；
- 气体云的体积大小；
- 气体云的同质性；
- 气体云中与化学计量浓度有关的气体浓度。

9.4.2 概率评价法 Approach to Probabilistic Evaluation

为了确立爆炸冲击载荷的概率表现，必须将导致爆炸发生的所有事件方面按顺序做一个全面的统计分析。包括如下方面：

- 泄漏源的位置；
- 气体喷射的方向；
- 泄漏气体的流速；
- 风向和风速；
- 限制气体云大小和持久时间用的屏障元素的性能。

所有的参数都需要定义概率分布。这可以从风力条件的环境数据中获得。通常情况下，孔径分布也可以从泄露数据中获得，这样就可以生成流速的分布状况。泄露位置和方向分布通常基于几何学考虑。

这些变量将生成散布计算流体力学(CFD)仿真的输入场景。大多数参数可能都有连续变量，理论上即可以产生无数散布场景。为了限制案例的数量，必须对这些数据进行某种形式的分类。分类基础应与场景本身越不相关越好，以反映特殊的要求和考虑因素。如果考虑到从凸缘发生的泄露，那么方向变量就对应于360°。简单的分类方法将方向分成两种：水平面之下和水平面之上。如果凸缘靠近屋顶，同时在泄漏源一侧上部和附近区域存在垂直桁架，则这些制约因素会限制气体喷射的自由流动和随后气体云的散布。两种类别进行隔离的拐角正是气体喷射分布在桁架两边的位置。

然而，即使所有参数都进行了分类，所需的散布计算量可能还是很大。因此，对散布情况进行仿真时必须利用粗略的网络进行设置，这样可以减少计算时间。

当散布仿真完成之后，将有必要减少爆炸冲击载荷仿真的案例数量，这通过排除不可点燃的案例和按照气体云条件分类相似案例完成。

一个困难之处是如何识别出能够达到可点燃气压的散布场景，而同时气体云在空间或时间上的分布不足以产生具有明显爆炸波效果的爆燃。1988年，在Spade Adam完成的大规模气体泄漏散布试验中，这显得尤其重要(ERA，1998)。

当所有无关的散布场景被排除之后，剩余的案例应进行爆炸仿真，仿真可将其中某些案例合并成更宽泛的分类。当所有案例的爆炸冲击载荷仿真完成之后，可以通过组合仿真爆炸冲击载荷和场景概率来生成爆炸冲击载荷分布。

9.4.3 概率评价 Probabilistic Evaluation

不确定性仿真取决于将不确定性表示为一系列参数的函数的能力和对过压与讨论参数之间关系的知识。下文对这些方面进行一些定性的简要讨论。

该评估基于一个简化的模型，该模型没有将顶边结构爆炸冲击与消防工程(BFETS)测试项目中的经验全部考虑在内。尽管如此，该评估依然对阐述主要参数及其影响非常有用。

应当强调的是，爆炸冲击载荷概率分布的科学还远未达到牢固确立的程度。下述观点应被视为对某些重要方面的概述，而不应被视为对应当做什么的具体推荐。

9.4.3.1 分布 Distribution

过压变化作为基本参数的函数并不为人熟知，在一些案例中被大幅度简化，因此必须使用粗略的模型和函数。一旦每一个分布都已知(或已建模)，则可以通过下列方法之一可生成总分布：

- 统计仿真；
- 数值解。

舍夫泰克(Safetec)咨询公司有一款生成此类分布的内部软件工具，名为SERA(舍夫泰克爆炸风险评估器)。其他咨询公司也有类似的工具，但是下述方法均基于舍夫泰克公司的信息。图 9.10 是 SERA 方法的流程图。

注意，SERA 模块 1 包含一个气体散布模块以及起火概率模型，而 SERA 模块 2 则合并了气体云体积的起火频率与生成的爆炸过压结果。因此分布实际上是在第二个模块中创建。

有多种可以生成 SERA 输入数据的后果分析。主要的输入数据如下：

- 对不同泄漏源位置、方向、风向以及风速组合的散布仿真；
- 通风仿真；

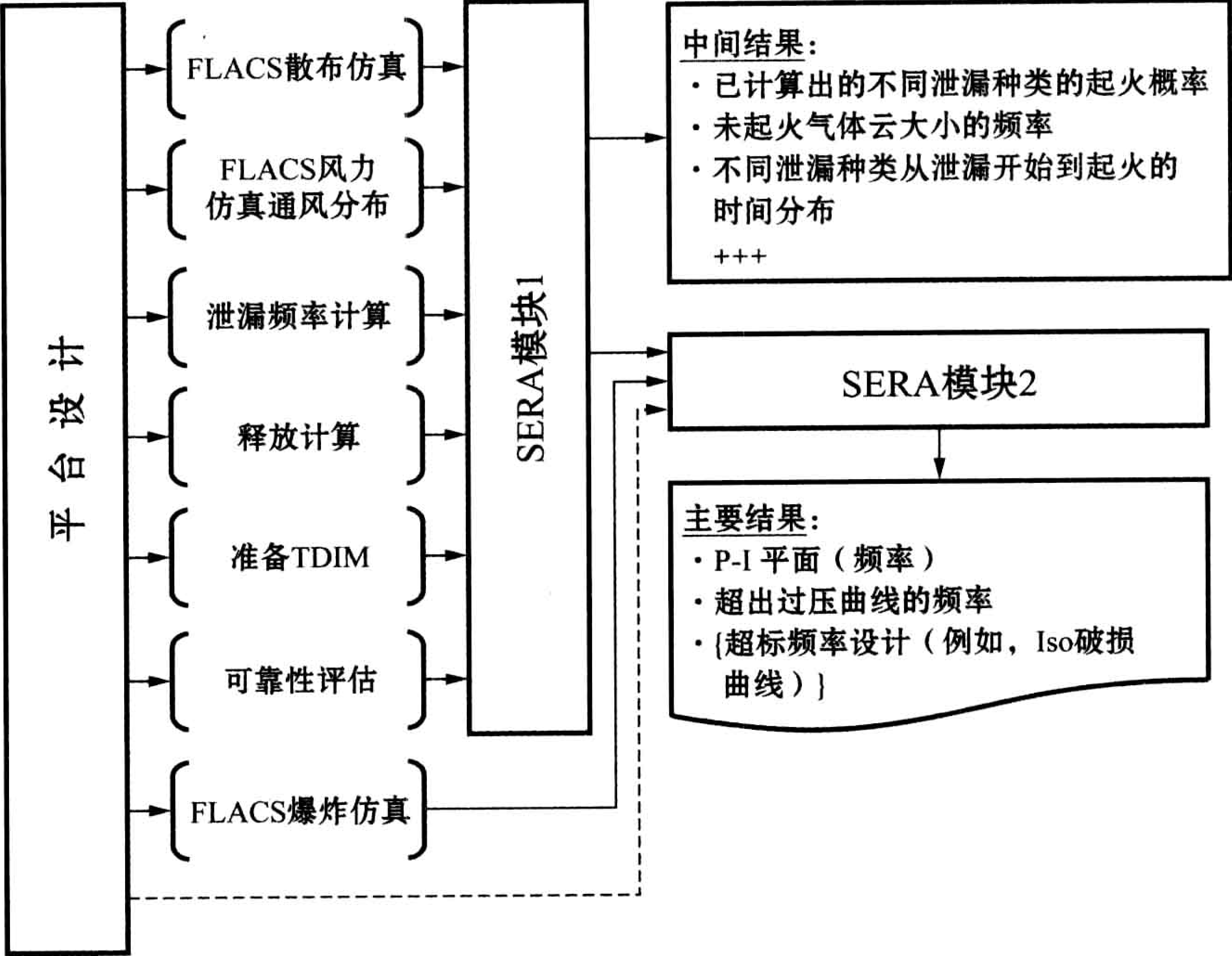


图 9.10　采用 SERA 法进行爆炸概率分析的流程图

- 泄漏源和大小的气体泄漏频率；
- 计算碳氢化合物释放量，以建立泄漏率与时间的关系函数；
- 起火概率建模的输入数据，采用在第 6.7.4 节中描述的“联合工业项目(JIP)”模型；
- 屏障系统/元素的可靠性/可用性数据。

SERA 模块 1 有一个简化的散布模型，按时间函数计算可燃气体和等价化学计量的比例。散布模型在计算环当中使用，以计算所有泄漏曲线和通风条件的结果。图 9.11 显示了在相对较高气体泄漏率和低风速条件下的散布计算输出结果。

SERA 模块 2 组合了模块 1 内等价气体云分布和爆炸过压值，并在计算缺失的爆炸过压值时使用了线性插值方法。图 9.12 给出了 SERA 输出结果的例子，阐述了特定结构元素的过压分布。

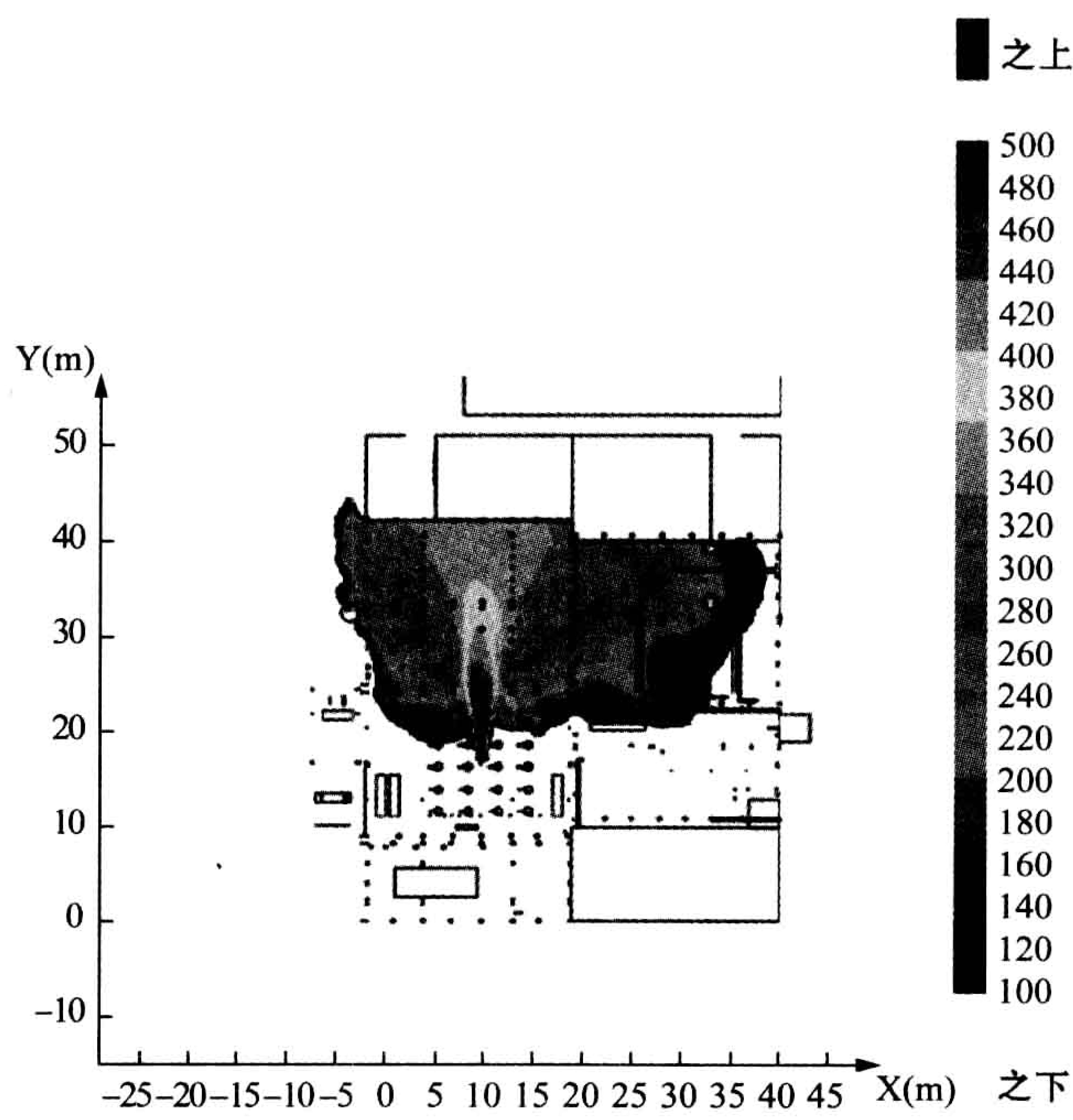


图 9.11　散布计算输出示意图，气体泄漏速率为 5kg/s，低风速（图中的最大气体云大小对应爆炸下限的浓度范围，所有从井口到对面井口的中间喷射都大于爆炸上限浓度）

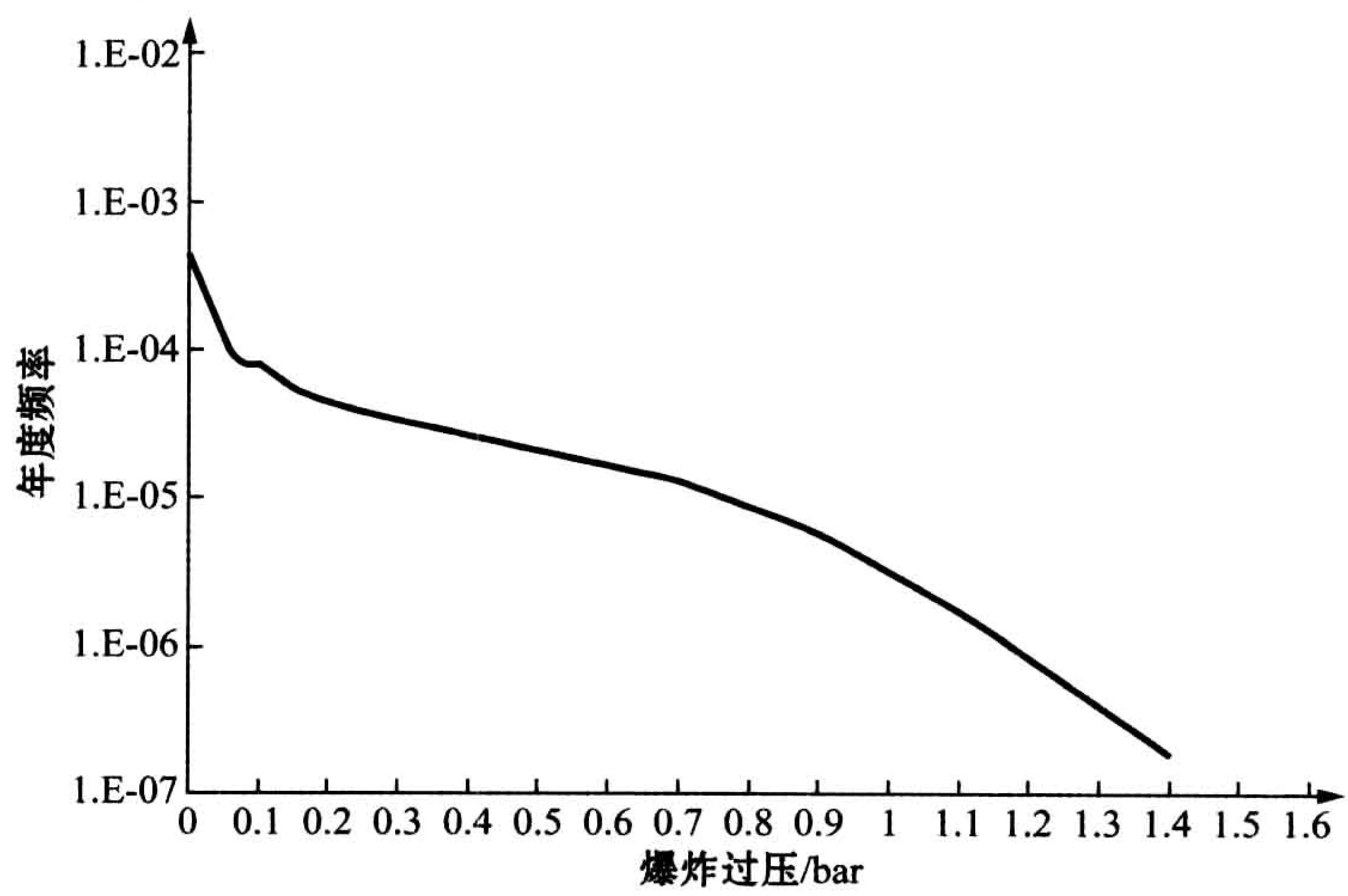


图 9.12　SERA 输出的过压频率曲线

9.4.3.2 气体泄漏源 Gas Leak Sources

潜在的气体泄漏源的详细信息对于散布计算非常重要。因此必须考虑这些详细信息。以下方面需要确定：

- 泄漏源在三维空间中的位置；
- 气体成分和特性，即温度和特定的重量；
- 泄漏率；
- 泄漏源的气流方向；
- 非受限气体喷射或扩散气体泄漏。

如果所有这些参数允许变更，即使每个参数的变量限定在少量的种类范围内，也将产生大量的组合。

9.4.3.3 通风和散布 Ventilation and Dispersion

通风条件也对气体泄漏散布及其产生的气体云有较大影响。大多数海上设施均可自然通风，这意味着气体泄漏的散布受风力和风向的影响非常大。

风力条件中的变量是对上述气体泄漏特性的变量的补充，这意味着有更多的参数数量。

因此，即使这些变量限定在大型分类中，也不可能对所有可能组合都执行气体散布仿真(采用计算流体力学代码)。只能选择一系列代表性参数。经验可能是决定如何选择代表性参数的唯一办法。有人指出，代表性参数的数量应该限制在 10 个左右。对比可能的大量变量数，这个限制值看来过低了。但在具体的研究中，期望选择约 30～50 个参数也不太现实，只有经验能确定建立一个代表性分布需要的参数数量。

9.4.3.4 起火源 Ignition Source

起火源的实际位置跟起火源类型非常相关。这对产生的爆炸过压值有极大影响。共有以下几种类型的起火源：

- 旋转设备：这些设备都是大型设备，起火源的分布比较分散，跟每个设备的位置有关；
- 电气设备：电气设备中潜在的起火源数量通常非常多，一般可以使用连续函数对这种情况进行恰当描述；
- 热加工（如焊接）：在大多数场所可能都存在热加工作业，所以区域（或体积）连续分布可能最具有代表性。

对过压的影响主要来源于起火源与障碍物之间的位置关系，其中障碍物会产生湍流，进而增加火焰锋速率并产生过压。

当考虑潜在的泄漏源时，这些参数必须与泄漏和通风特性相关联。举例而言，如果泄漏气体水平运动，并紧贴地板平面，且密度大于空气，则只有靠近地板平面的起火源才可能是爆炸的潜在祸根。

9.4.3.5　起火强度 Ignition Strength

起火源的强度很大程度上取决于其类型。起火强度同样也会影响可能产生的最大过压，因此，起火源的类型也影响着所产生的过压大小。

9.4.3.6　气体云特性 Gas Cloud Characteristics

过压大小取决于气体云的以下特性：

- 气体云的体积：气体云的大小取决于泄漏率、通风、起火时间和位置。气体云越大，则产生的过压值越高。
- 气体云的同质性：气体云中的一部分可能在爆炸极限范围之内，而其他部分可能在范围之外。理论上讲，只有爆炸极限之内的气体云部分才会参与到一次爆炸当中，但也有证据证明，爆燃本身也可能导致更多的气体云参与到燃烧过程中。
- 气体浓度：理论上讲，最高的过压值应当从气体云中的化学计量浓度中得出，但有证据表明，由浓度得出的最高过压值实际上略高于理论值。大多数计算假设了化学计量浓度。越来越多人开始使用 FLACS 软件工具进行仿真，此方法基于仿真气体散布，可以更准确地反映实际情形。

事实上，所有现实中的气体云都远远达不到同质性条件，而大多数试验数据却都是基于同质化学计量气体云来进行计算。这可能是将试验数据导入建模时最不确定的因素之一。

在 Spade Adams 进行的散布试验(ERA，1998)已经证明，实际的气体云同质程度可能比原先预想的情况还要低。对目前非同质气体云的实践是为了确定化学计量的同质气体云的等价尺寸，以作为过压仿真的输入条件。这可能是导致仿真数据异常保守的一个因素。

9.4.4 实例 Example

图 9.13 给出了一个离岸平台采用 SERA 计算方法得出的结果。SERA 得出的结果可用于以下方面：

- 最大过压值通过使用 FLACS 仿真确定。最大过压值是 SERA 仿真的输入值。
- 甲板上生产设备的二次破裂极限主观估算为 0.5bar(0.05MPa)。计算进行了适度简化，以免出现大量的结构响应计算。
- 图 9.13 给出了对在爆炸实例中事故后果加剧条件概率的粗略估计。

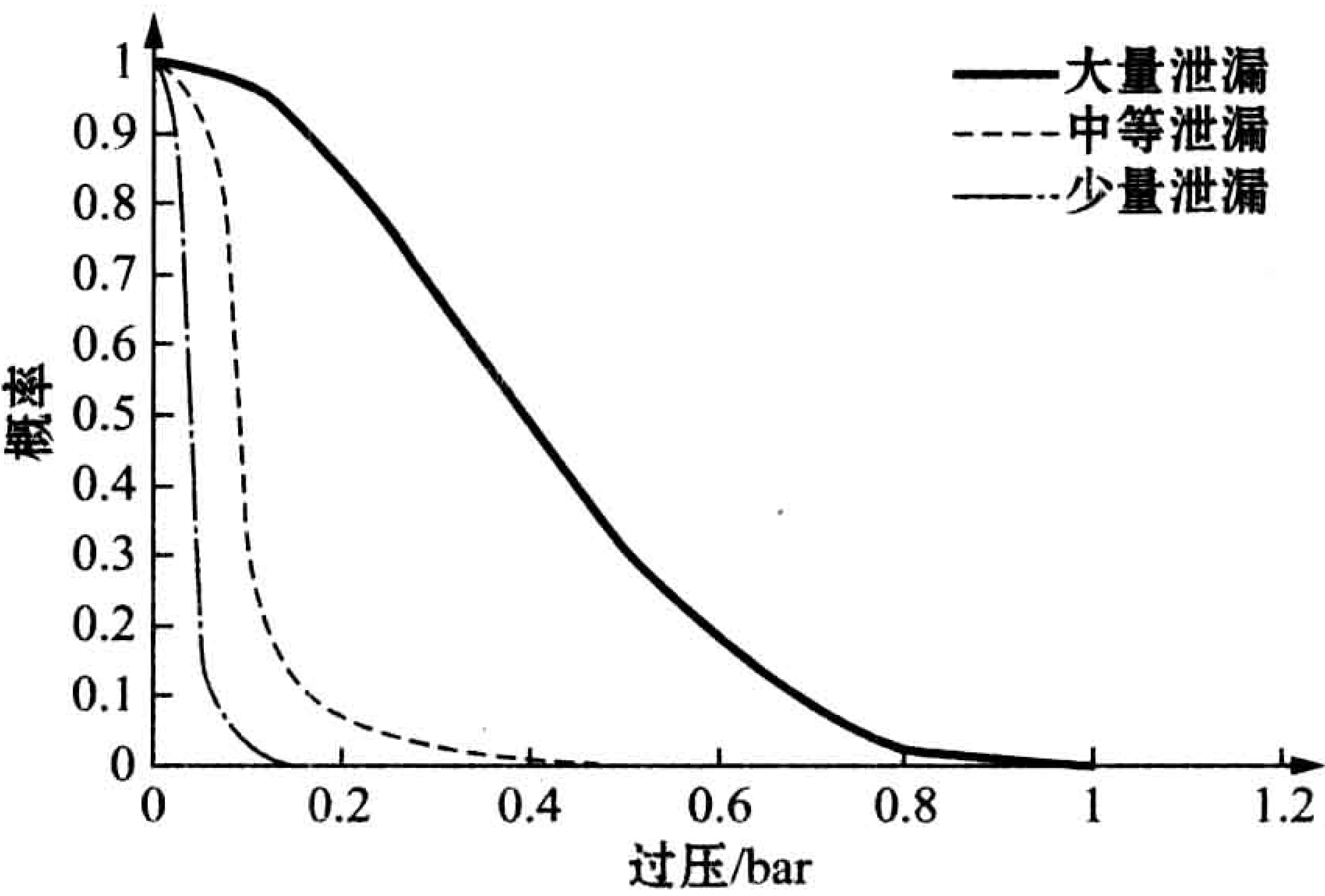


图 9.13 基于 SERA 结果的条件超标概率分布

9.4.5 使用载荷函数 Use of Load Function

第 2.3.6 节介绍了确立爆炸冲击载荷的随机描述的需求。之前的第 9.4.2 节至第 9.4.4 节介绍了如何利用最新的知识来实现这个目标。本节将讨论概率方法的使用。可以采用以下方法之一使用超标图表：

- 根据 ALS 准则计算载荷评估　　计算所有相关的爆炸场景的总体年度超标频率，然后确定 ALS 检查的爆炸载荷（参见第 13 章）；
- 量化风险评估（事态加剧概率）　　如果已知设备对爆炸载荷的抗力，则亦可知二次破裂（事态加剧）的概率。

下述是确定甲板结构爆炸的设计意外载荷的流程（符合挪威承载结构规范）。

1）按照可能面临的不同爆炸场景将甲板结构分成不同的部分。

2）系统故障概率（每年 10^{-4}）按照每部分的分摊值进行划分。这种分布很“随意”，同时优化了结构，可能包含对这些分摊值的几次重新分配。

3）甲板结构的每部分都绘制了过压的超标图。

4）识别出系统故障概率所容许每个部分的分摊值所对应的设计爆炸载荷。

5）检查是否存在更易执行、花费更低的甲板结构各部分系统故障概率的替代分布方案。

9.4.6 结构响应的计算 Structural Response Calculations

当前，人们发现爆炸冲击载荷比之前估计的要高，因此这里必须在响应计算上多做一些介绍。可用选择如下：

- 简化三角压力脉冲，其中最大载荷和持续时间是必需的特性。最大过压值通常限制为持续时间至少超过 1msec 以上的脉冲。
- 详细的压力-时间对应历史值。

依然需要采用相对更复杂的结构分析，这样可以比静态分析提供更多的信息。此分析所使用的软件包应当能考虑以下要求：

- 压力-时间历史值的动态响应（详细或简单的三角脉冲）；
- 结构相应的非线性部分。

结构和设备上的拉力同样也需要进行计算，同时此载荷响应计算应当将动态部分的情况考虑在内。应当注意，可以进行此类分析的软件包并不是很多。

9.4.7 概率法是最好的解决方法吗？ Is a Probabilistic Approach the Best Way Forward?

此前的章节简要说明了如何使用概率法进行设计爆炸载荷的评估。原则上这种方法是完全可行的，但是却有些费时。这也是为什么有人会怀疑其可行性的原因。这种方法的另外一个难以执行的方面是现实数据，在海上生产设施上已发生的爆炸事件（见第 9.2.2 节）中，从未出现过如此高的爆炸冲击载荷值。当经验无法证明如此丰富的变量时，如果还将大量的资源花在仿真结果上面，可能显得不切实际。

正如前文所述，主要的挑战是自由变量数量太多。这意味着，即使每个变量限制在一定范围内，变量的总数依然非常多。这导致需要进行的气体散布仿真量将会非常可观。能够将仿真量减少到一个易于操作的数据集规模的方法目前尚未发现。

因此，随着时间推移，开发确定性规则可能会变得非常有实际意义，这些规则作为设计基础使用。为了创建此类规则，很可能需要丰富的经验作为基础，如果没有现成的丰富经验可用，很可能还需要一些时间去进行积累。

9.5 降低爆炸风险 Explosion Risk Reduction

9.5.1 设计基础的确立 Establishing Basis for Design

1995/1996 年之后的 2～3 年内，爆炸危险的设计基础有了显著的变化。英国于 1974 年发生了弗利克斯巴勒事故，人们因此把注意力放在如何防止严重爆炸事故的出现上。尽管如此，在 20 世纪 80 年代中期之前，很少有人关注如何减轻爆炸危害。在 20 世纪 80 年代中期，爆炸设计方法的发展可以总结如下：

- 基于对危害状况的认识，定义了最坏情况下的案例情形；
- 利用被认为合适的工具进行最坏情况下的载荷仿真；
- 即使在最坏情况的案例中，仍然可以找到最有效的设计方案。

这种状况在几年之后就变得大有不同，最终以名为“Spade Adam”的试验集结束(SCI, 1998)。现在人们已经懂得，最坏情况案例的情形是非常严重的，以至于不可能找到一种最有效的方法来应对最坏的情形。因此需要引入另一种基于概率建模的方法。

这种新的认识要求对现有海上设施和新海上设施进行改进。新海上设施中值得考虑的工程作业挑战包括：

计算结构和设备尺寸以应对爆炸冲击载荷，包括：

- 浮式生产储油泄油船(FPSO)的主结构或船体；
    - 浮式生产储油泄油船(FPSO)油罐顶部的甲板支撑结构；
    - 模块结构；
    - 船舶及管系的支撑；

  - ○ 爆破和防火墙。
- 载荷的定义包括：
  - ○ 所有 x、y、z 坐标上的过压峰值；
  - ○ 镶板压力；
  - ○ 脉冲或时间压力分布；
  - ○ x、y、z 坐标上的拉力（“爆炸风”）。
- 其他关键方面包括：
  - ○ 碎片；
  - ○ 结构移动。

9.5.2 顶边结构爆炸冲击与消防工程研发经验 BFETS R&D Experience

近来最大型的研发工作就是顶边结构爆炸冲击与消防工程(BFETS)项目(SCI，1998)。该项目包含大量的测试集和大规模的现实离岸模块几何模型。这些测试在体积 1 600～2 700m^3 的模块上进行，设计能够承受的爆炸过压值可以达到 4bar。已研究过的参数包括以下几类：

- 空间密闭性；
- 拥堵度；
- 起火位置；
- 喷淋系统效果；
- 喷淋系统水滴大小；
- 仅同质化学计量气体/空气混合气。

这些测试由欧洲的石油公司和英国健康与安全管理局(HSE)共同合作完成。健康与安全管理局认为试验的中期结果非常重要，所以他们将这些数据向业界公布，以便可以尽早实施一些必要的决定。主要结果现整理如下：

- 测得的过压值要高于期望值(基于之前的中型试验结果，如 CMR 试验)；
- 由于超出了设计极限，在一些测试中模块出现破损；

- 模块内的拥堵度是决定过压值的重要参数；
- 典型的全局载荷特性包括：
- 由燃烧产物生成和通风引起的损耗之间的平衡决定；
- 对主结构设计至关重要；
- 与局部效果相比，更接近于预测值。

典型的局部载荷特性有：

- 由气流、湍流、反射、混合等局部物理机理决定；
- 对舱壁、局部结构和设备的设计非常重要；
- 有时候局部值很高。

基于以上结论，可以将局部效果和全局趋势分别整理如下：

- 局部效果：
    - ○ 受制于压力-时间曲线；
    - ○ 难以预测；
    - ○ 持续时间短，可能需要考虑脉冲载荷的影响；
    - ○ 如果持续时间短，脉冲载荷带来的结构响应/损害会小一些。
- 全局趋势
    - ○ 通常预测较为容易；
    - ○ 与利用最佳软件工具完成的预测结果契合程度高。

9.5.3 主要经验，缓解 Main Experience，Mitigation

爆炸排气装置的局部效果并不是每次都符合预期。如果增加爆炸排气装置的区域，那么预期过压会减小。虽然从全局趋势来看，这种预期是正确的，但是并不是所有的局部条件下，这种预期都能成立。

如果尺寸较小的物体数量足够多，它们将会对模块拥堵度产生更大的影响。试验结果充分说明了尺寸较小物体产生的显著效果。当模块阻塞比从

7.5%(所谓的“低”阻塞比)增加到9.5%(所谓的“高”阻塞比)时,过压峰值将增加4倍。正如中型试验所示,在众多尺寸较小的设备中,电缆托架和管架是导致过压增加的最关键设备。对长火道而言,最关键的因素已证明是设备密度。

一个降低潜在风险的最重要措施是采用喷淋系统以减小爆炸冲击载荷。如果发生意外,喷淋系统需要在起火之前即启动(如探测到有气体泄漏时)。试验已证明,使用喷淋系统可极为有效地预防所谓的失控火焰加速。然而,所有试验同时还证明,喷淋系统的充分使用可以降低过压峰值。对于长烟道,降低效果最为显著。如果在理想条件下,降低效果可能会相当显著。

理想条件要求喷淋系统的水滴要比普通水滴大一些,这样就要求特殊的喷嘴设计。然而,喷淋系统若使用了标准尺寸的喷嘴,过压的降低量将会更低,但降低值跟具体情况有关。

利用喷淋系统降低过压最关键的一环是必须在起火之前启动系统。从起火建模的结果来看,从气体释放到起火最可能的间隔是2～3min。因此,喷淋系统必须在第一个半分钟之内启动,方才有效。

9.5.4 降低风险的可能性 Risk Reduction Possibilities

9.5.4.1 优先级 Priorities

降低风险的通用办法是先考虑降低事故发生的概率,而后考虑减轻事故的后果。但是由于以下原因,降低概率通常可能很难被证实:

- 降低概率可能取决于操作方法,而操作方法的可信度有限。
- 虽然概率的理论效果可以明确地量化,但是降低的量化结果却无从得知。

通常,如果采用了被动措施,减轻后果是一种更容易证实和可靠的方法。下文将具体讨论与气体爆炸有关的降低概率和减轻后果的选择。

9.5.4.2 降低概率——通过设计预防气体泄漏 Probability Reduction—Prevent Gas Leaks through Design

预防气体泄漏最直接的方式就是减少潜在泄漏源的数量，通常就是凸缘的数量。新海上设施最容易采用此种预防方式。对于已有的海上设施，虽然技术上依然可行，但是改造本身可能会导致风险增加，因为在改造工作中很有可能需要进行明火切割和焊接。

因此连接方式的选择必须折中考虑以下两种情况：一是使用全焊接以防止出现泄露；二是将焊接接口拆除（打开）时的热加工量需要减到最少。减少气体泄漏的其他替代方法包括：在生产区提高维护工作的质量；选择更高质量的垫圈材料；追查微小的泄露，以及早确定泄露趋势和不希望出现的倾向。

9.5.4.3 降低概率——通过操作预防气体泄漏 Probability Reduction—Prevent Gas Leaks through Operations

目前已经证实，近几年来，绝大多数的碳氢化合物泄漏都是缘于操作/维护/检测时出现的损失，至少在挪威大陆架上如此（见第 6.6.1 节）。

防止气体泄漏一个最有效的方法是改进操作屏障。在此连接中可以采用的一种方法是屏障与营运风险分析（BORA）方法（见第 6.2.6.1 节）。

9.5.4.4 预防可点燃浓度 Prevent Ignitable Concentration

当气体泄漏出现时，下一个可能终止事故发展的措施是防止形成可点燃气体。充足的自然通风是明显可实现此目的的措施之一。在设计阶段，通常都会考虑到充足的自然通风，但在操作过程中，有时候自然通风量会因临时安装的设备或临时置于开口处的设备而减少。其他情况包括由于需要提高工作环境（减少制冷气流）而有意减少自然通风。

增加自然通风量通常要在减少起火概率和劣化工作环境之间取得平衡。如果增加通风量，通常会带来更低温的工作条件，有可能使得设备冻结。

9.5.4.5 预防起火 Prevent Ignition

下一个选择是防止爆炸气体被点燃。与此目的相关的措施可能包括：

- 减少热加工活动的范围。此措施已在许多海上设施上成功实施,证明了多数作业都可以“低温”方式完成,即不进行热加工。
- 改进“防爆”设备的维护。许多海上设施上,某些防爆设备的常规维护工作可能不合理,最典型的就是照明设备。
- 同样还应关注所谓的“连续源”,即一直工作的潜在起火源,如照明灯。

预防起火是最后一个降低爆炸概率的措施,因此下文简要列出了降低措施的顺序。

9.5.4.6 预防高速湍流 Prevent High Turbulence

有一些基本的设计规则可以起到预防高速湍流的效果。这些规则总结如下:

- 优化设备的布置;
- 避免大量使用多部件设备;
- 优化与潜在起火源相关的管架位置。

这些规则如图 9.8 和图 9.9 所示。

9.5.4.7 防止高阻塞比 Prevent High Blockage

提高通风效果的措施也可以同时防止模块产生高阻塞比,有助于防止过压增加。降低风险的措施包括:

移除操作和维护过程中安装的临时设施、集装箱、新设备和防风雨面板等;

调整船舶的布置使火焰锋最可能经过的通道的阻塞比最小。

9.5.4.8 安装消防与爆炸冲击屏障 Install Fire and Blast Barrier

可以在各模块和区域之间准备消防与爆炸冲击屏障来限制爆炸引起的事态加剧。然而,这些措施也可能会带来如下问题:

- 屏障(如墙、甲板)太多可能会给需充分通风的区域带来问题;
- 屏障也可能会限制爆炸排气装置的作用,同时带来更高的阻塞比;
- 对屏障的翻新可能需要大量的热加工作业,但这可以通过合理的计划和准备避免。

9.5.4.9 激活气体泄漏喷淋系统 Activate Deluge on Gas Leaks

上文已经提到过使用喷淋系统来降低爆炸冲击载荷,包括使用何种喷嘴的问题。然而,从某种程度上来看这也是一个有争议的问题。一些操作员认为在起火之前激活喷淋系统在过去也是引起起火的一个明显原因。虽然这种情况出现的次数不多,但不能因为案例发生在特殊环境下而忽视这个问题。

使用这种方法的潜在优点已通过在北海作业的公司的经历得到最佳证明。在过去几年中,曾出现了众多气体泄漏,但是都被即时"淋灭",没有出现任何事故。即便如此,在密闭气体探测上对喷淋系统的使用还是显得非常有限。喷淋系统可能带来的效果可以参见表 9.2 中顶边结构爆炸冲击与消防工程(BFETS)的结果。

表 9.2 带有/不带喷淋系统的顶边结构爆炸冲击与消防工程结果对比

参数	不带喷淋系统的爆炸冲击载荷/bar	带有喷淋系统的爆炸冲击载荷/bar
记录的最大值	3.73 (+155%)	1.46
记录的最小值	1.44 (+95%)	0.74
记录的平均值	2.38 (+118%)	1.09
持续时间大于 1ms 的记录最大值	2.29 (+83%)	1.25
持续时间大于 1ms 的记录最小值	1.05 (+46%)	0.72
持续时间大于 1ms 的记录平均值	1.76 (+69%)	1.04

表 9.2 对比了除了喷淋系统之外其他条件均相同的两种顶边结构爆炸冲击与消防工程(BFETS)项目(SCI, 1998)试验,尤其对比了同起火前激活喷淋系统有关的效果。使用的是标准离岸喷嘴。可以看出,对产生的最大过压的效果要高于对平均过压的效果。这说明大体上喷淋系统都可以实现这样的效果,即峰值载荷比平均载荷水平所受影响更大。

依据最大值和最小值生成的理想三角压力脉冲(至少持续 1ms)如图 9.14 所示。

三角压力脉冲可进行整合,以显示不同脉冲情况下的差异。结果如表 9.3 所示。

表 9.3　使用喷淋系统的脉冲值变化

	带有喷淋系统的最小值	带有喷淋系统的最大值	不带喷淋系统的最小值	不带喷淋系统的最大值
过压/bar	0.717	1.251	1.051	2.294
脉冲/Nsm^{-2}	3047	4504	2102	12732
脉冲变化量/%			−31%	183%

值得注意的是,使用喷淋系统之后,出现最大过压的位置的脉冲降低量可达到 183%,而出现最低过压的位置的脉冲实际上有所增加。图 9.14 显示了此种情况下增加的持续时间。

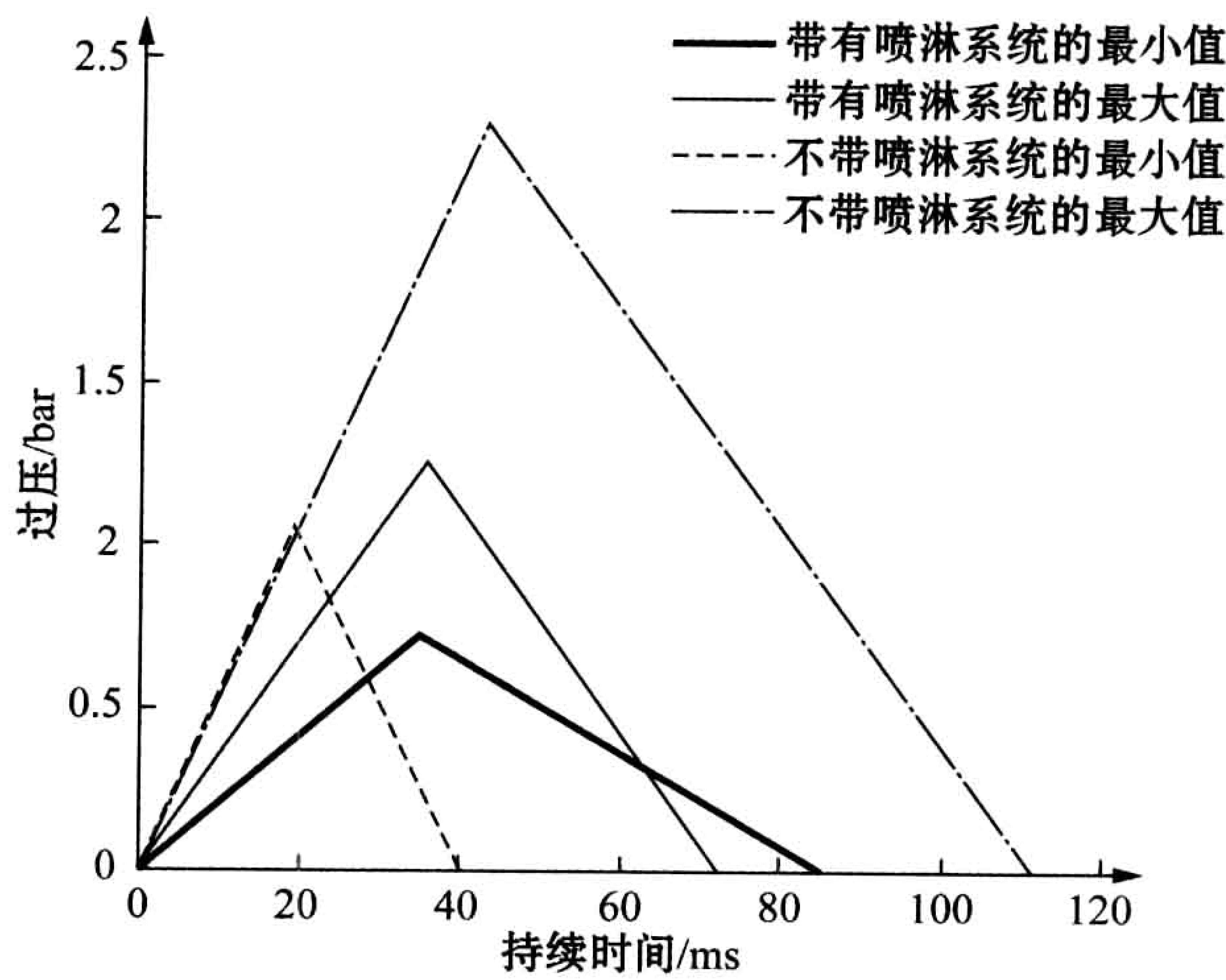


图 9.14　理想三角压力脉冲

应当注意的是,所记录的最小过压都出现同样的物理位置,而记录的最大过压的物理位置却变化很大。

最后还应注意的是,如果使用大水滴的喷嘴,改进效果可能更加显著,这说

明大水滴分成更多水滴消耗更多的能量。

9.5.4.10 提高设备和结构的抗力 Improve Resistance of Equipment and Structures

最后一个可能减轻后果的措施是提高设备和结构对爆炸影响的抗力。大规模爆炸试验项目(SCI，1998)已经证明设备对爆炸载荷的抗力(在某些案例中最大过压可达到 4bar 以上)比预想的效果要好。然而,对于已有的海上设施,设计额外的爆炸过压抗力的花费可能会非常高。

9.6 实例,爆炸冲击载荷的量化 Example, Dimensioning Against Blast Load

9.6.1 引言 Introduction

爆炸冲击载荷的量化可恰当地说明与事故载荷相关的函数规则所提供的自由度。在此说明中很适合使用爆炸冲击载荷,这是因为爆破载荷可以通过一维函数来描述。火灾载荷则要远远复杂得多,这是因为存在几种自由度,包括持续时间、强度、辐射量、对流和烟熏等引发的载荷。另外要声明的是,爆炸载荷之所以显得更为简单,是因为我们进行了一些简化。如果我们考虑完整的压力-时间函数,爆炸载荷将变得同样复杂。

这一说明包括对一个简单的无人操作井口平台甲板结构的测量,在适用情况下采用了承载结构的规则。

9.6.1.1 平台设计 Platform Design

平台是一个简单带有 4 口井的海上设施。井口位于井口区内和生产区的一级隔离处内。图 9.15 所示为位于平台甲板结构内部的主要区域的示意图。

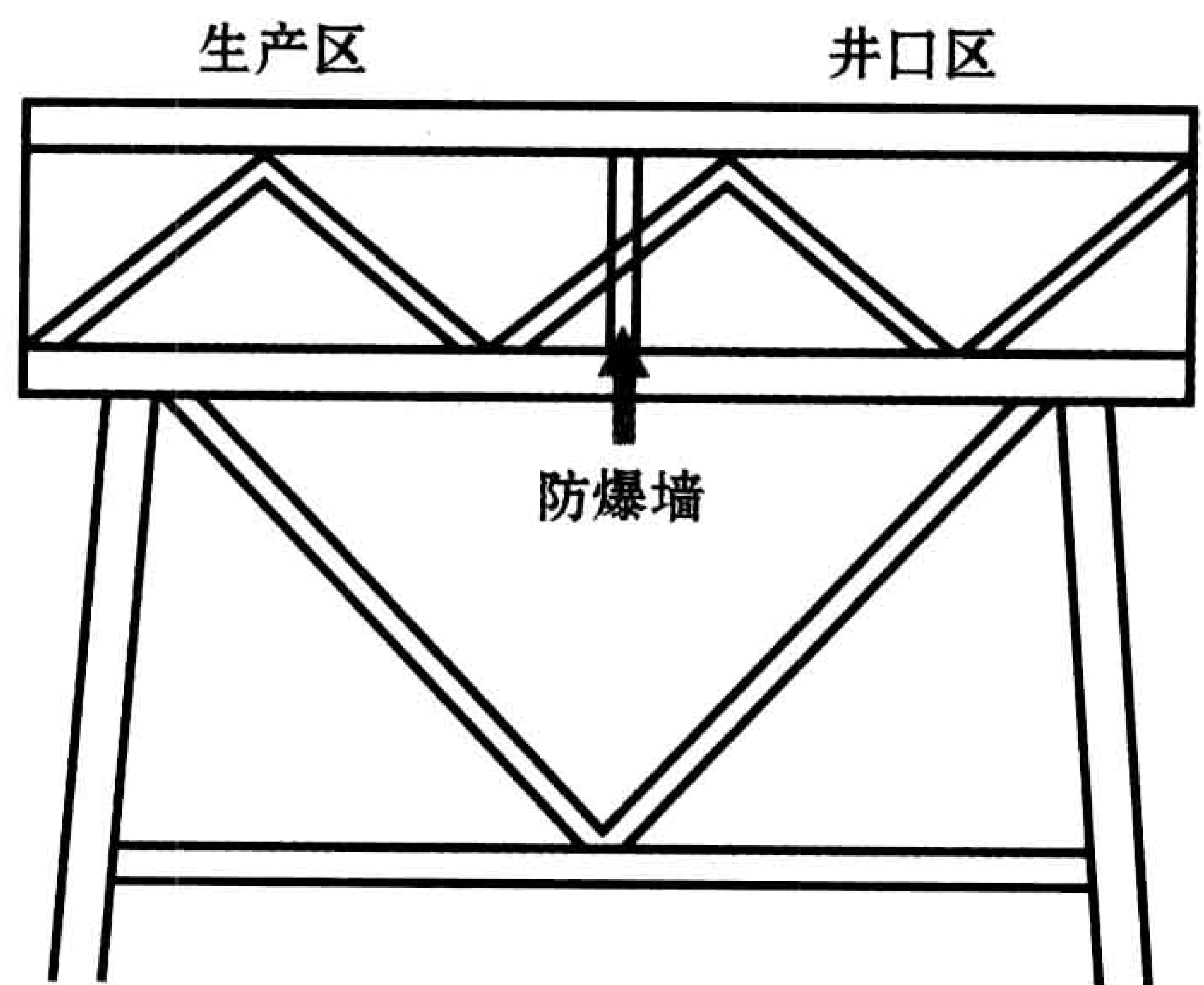


图 9.15　平台草图

两个区域被一个防爆墙隔离。

防爆墙用于隔离这两个区域，以使得一个区域内发生的爆炸不会影响到另一个区域。防爆墙的设计可以抵抗两个区域内最严重的载荷强度。

9.6.1.2　爆炸冲击载荷的泄漏源 Sources of Blast Loads

在设计解决爆炸冲击载荷问题时，需要识别出气体爆炸的泄漏源。对于讨论当中的简单平台，发生气体爆炸可能由于以下气体泄漏源所致：

- 采油树、井口或井喷带来的泄露；
- 隔离处气体泄漏；
- 海底气体泄漏。

对于以上任何一个区域，气体爆炸的出现概率可以通过式 9.4 计算：

$$f_{\text{气体爆炸}} = f_{\text{气体泄漏}} \cdot P(\text{起火})P(\text{爆炸} \mid \text{起火}) \tag{9.4}$$

9.6.2　量化的基础 Basis for Dimensioning

根据适用的挪威设备规范（PSA，2002c）中的规定，在对甲板结构的爆炸冲

击载荷进行损伤检测时，必须按照如下限制条件执行：

$$\sum P(\text{爆炸冲击载荷下的甲板故障}) \leqslant 10^{-4} \qquad (9.5)$$

对于讨论中的平台（爆炸冲击载荷如上文所述），公式可以写成：

$$P(\text{甲板故障}_{\text{井口}}) + P(\text{甲板故障}_{\text{工艺区}}) + P(\text{甲板故障}_{\text{海底}}) \leqslant 10^{-4} \qquad (9.6)$$

可对本案例进行优化，在这些来源之中分配故障概率，以使得所有故障概率总和为上文所述的允许极限。

9.6.3 设计能力 Design Capability

考虑到其他载荷，可以初步预估甲板的防爆能力。在本例中，初始的设计能力（静态载荷）为：

0.2bar（过压）

9.6.4 载荷分布 Load Distributions

9.6.4.1 井口区 Wellhead Area

图 9.16 显示了井口区域的条件超标概率分布。已确定的最大过压为 0.5bar。过压有 90%的概率超过 0.2bar，50%的概率超过 0.4bar。

9.6.4.2 生产区 Process Area

图 9.17 显示了生产区的条件超标概率分布。

在生产区，通常有许多障碍物会引发湍流和高速火焰，这将导致更高的过压。已确定的最大过压为 1.2bar。过压有 80%的概率超过 0.5bar，15%的概

率超过 1.0bar。

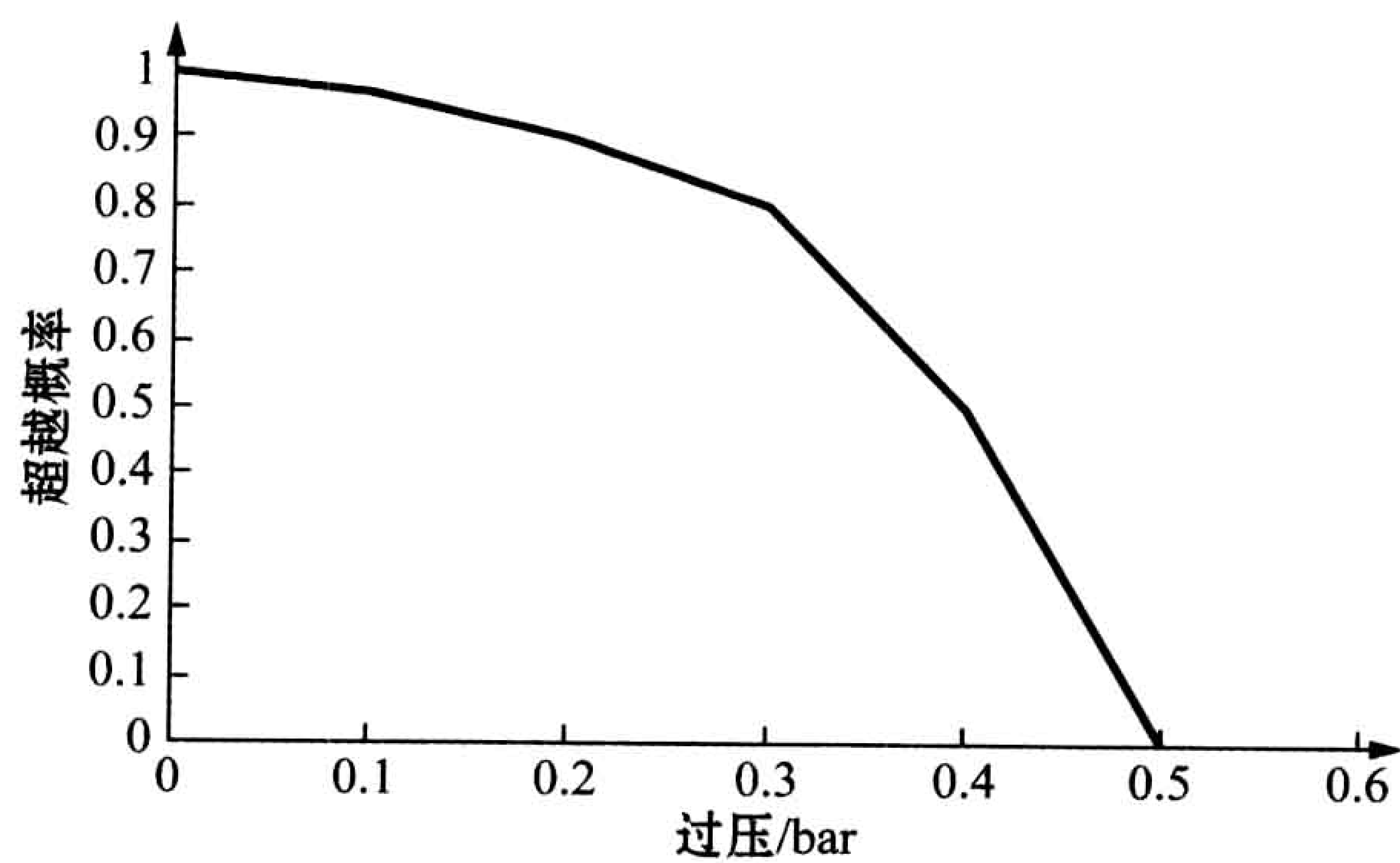


图 9.16 井口区的条件载荷分布

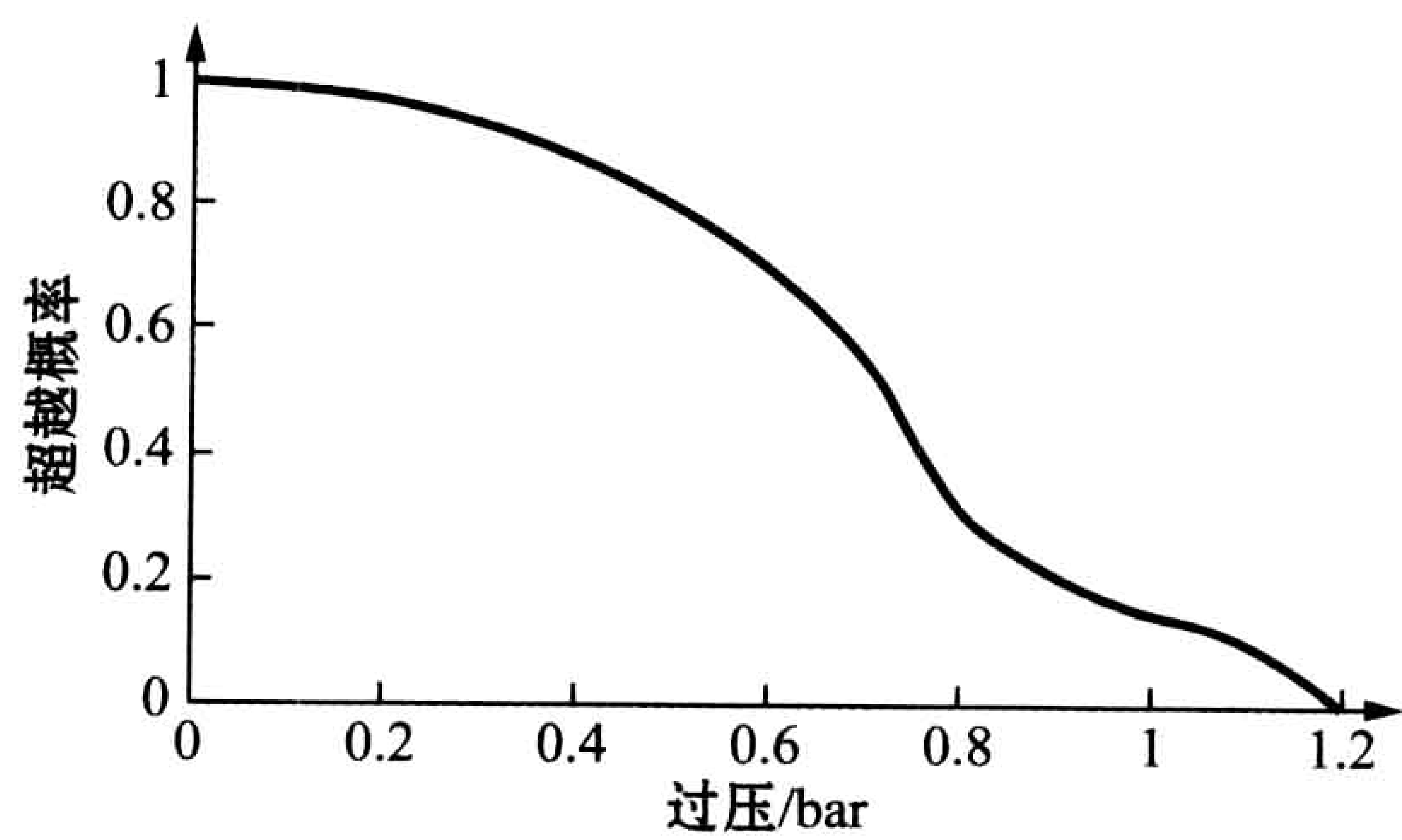


图 9.17 生产区的条件载荷分布

9.6.4.3 水下气体泄漏 Subsea Gas Leaks

图 9.18 显示了水下泄漏的条件超标概率分布。

对于水下泄漏源形成的气体云，一部分会飘到平台结构外，但仍有一部分留在平台内部。一些气体云不可避免地留在平台内部，并可能遇上起火源。通常过压会比较低，因为大部分气体云都在结构外。已确定的最大过压为 0.3bar。过压有 80％的概率超过 0.1bar，45％的概率超过 0.2bar。

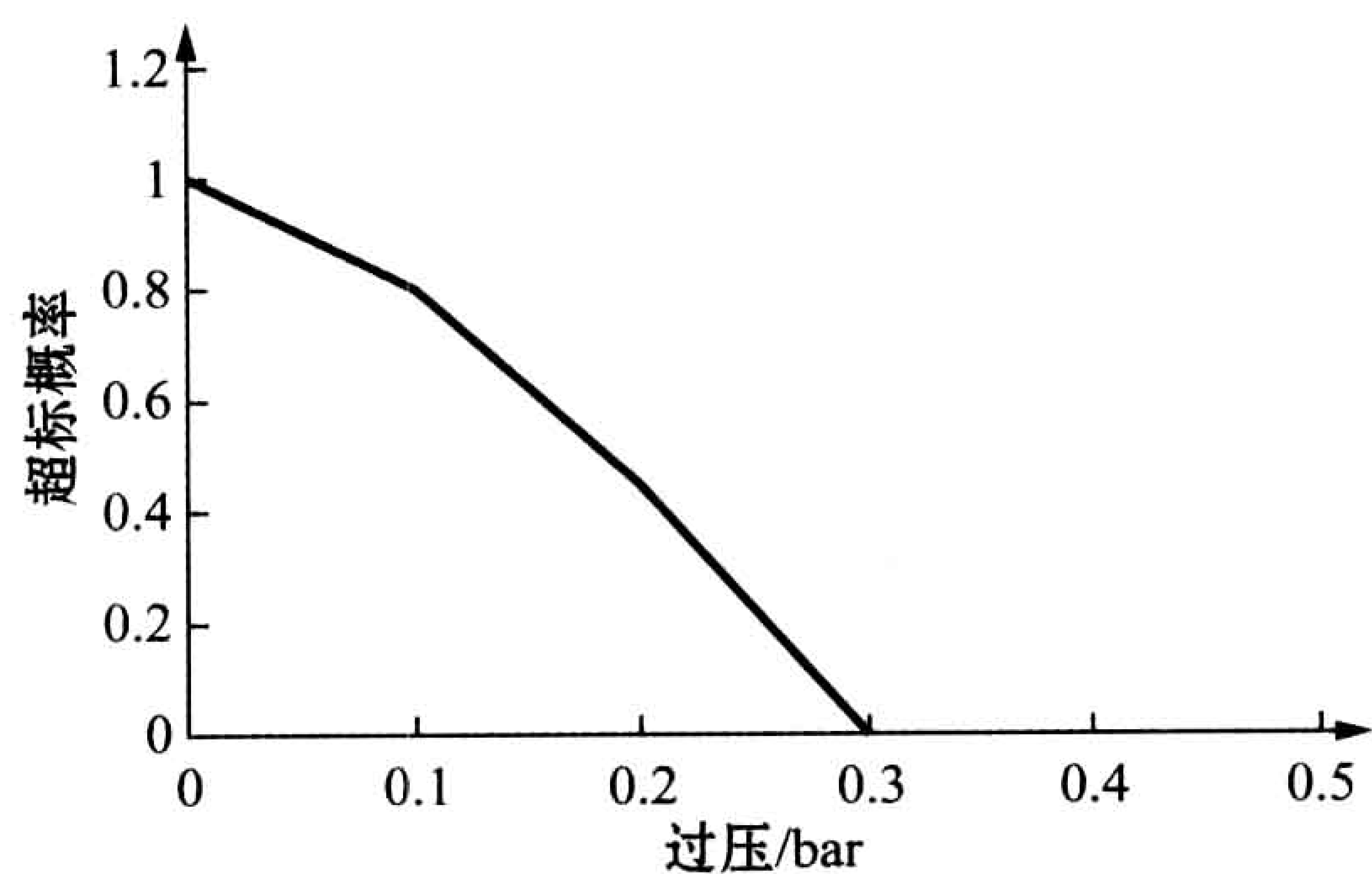


图 9.18 水下泄漏的条件载荷分布

9.6.5 气体爆炸频率 Gas Explosion Frequency

表 9.4 给出了基于事件树分析(未在表中给出)的气体爆炸的频率。在生产区爆炸引起的频率正好超过总频率一半,而在井口区气体爆炸约占总频率的 40%。

表 9.4 井口平台的气体爆炸频率

分布区	年度频率
井口区	$7.5 \cdot 10^{-5}$
生产区	$1.10 \cdot 10^{-4}$
水下	$2.8 \cdot 10^{-5}$
所有泄漏源总计	$2.13 \cdot 10^{-4}$

已经证实,生产区的爆炸情况最为严重,因为它们很可能引起最高的过压值。

将表 9.4 中给出的频率与图 9.16、图 9.17 和图 9.18 所示的条件载荷分布结合起来分析,则可得出如图 9.19 所示的超标函数示意图。假设每侧墙体的载荷阻力相同,则超标频率为每年 10^{-4} 的压力为 0.45bar。

与原来给定的强度 0.2bar 相比,这意味着结构需要进行加固以承受更高的载荷。在所给的过压值下的故障频率如下:

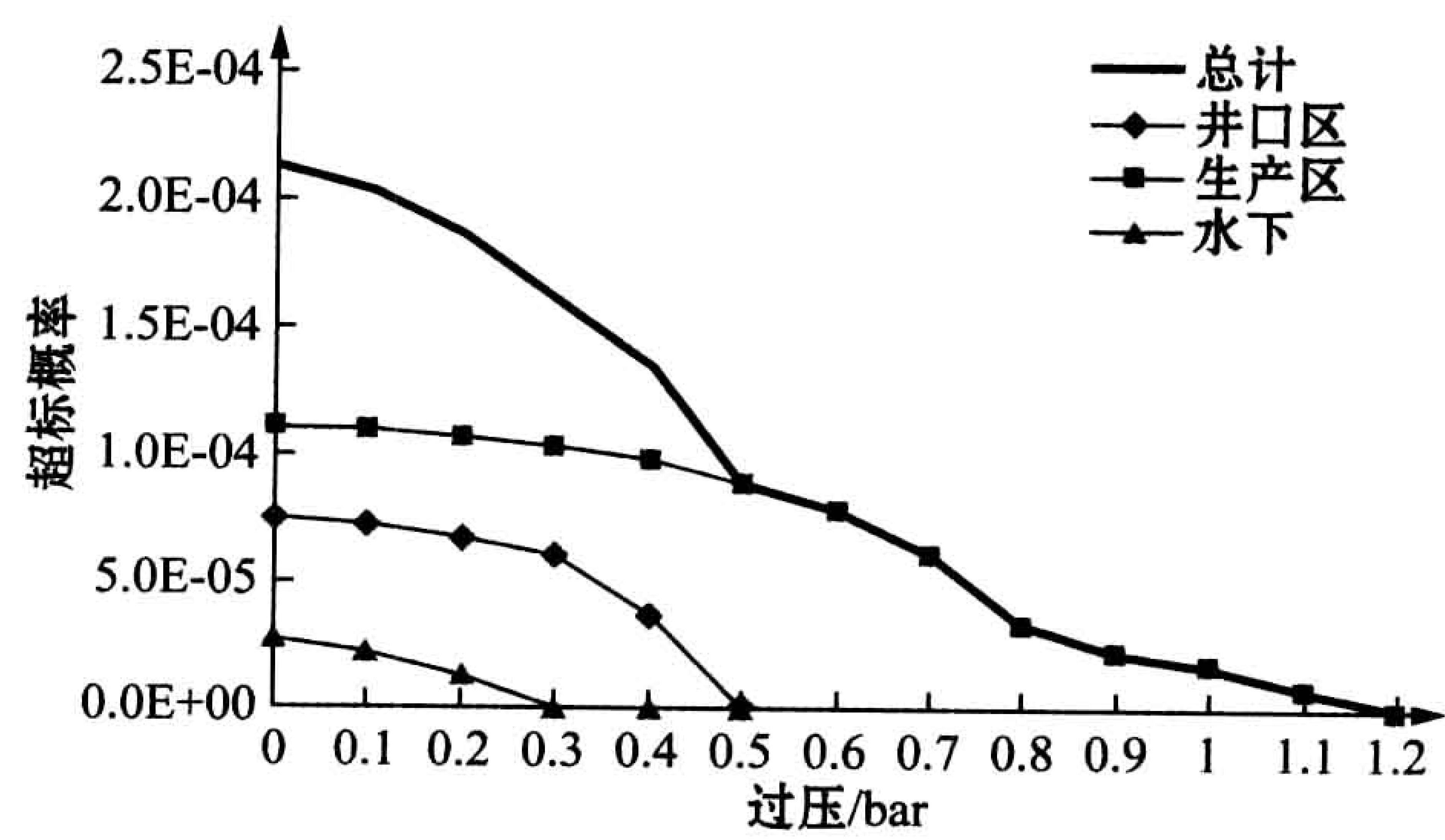


图 9.19 气体爆炸的超标图

- 井口区 $2.0 \cdot 10^{-5}$ 每年
- 生产区 $8.0 \cdot 10^{-5}$ 每年
- 水下泄漏 0

9.6.6 结构强化的成本 Reinforcement Costs

规范允许我们在区域内以任意方式分配故障频率。这可以用于优化。通过假设在墙体不同侧设置保护装置可能导致成本上的差异,这一点已得到现有研究案例的证实。

图 9.20 显示为了能够承受更高爆炸冲击载荷而对井口区甲板结构进行加

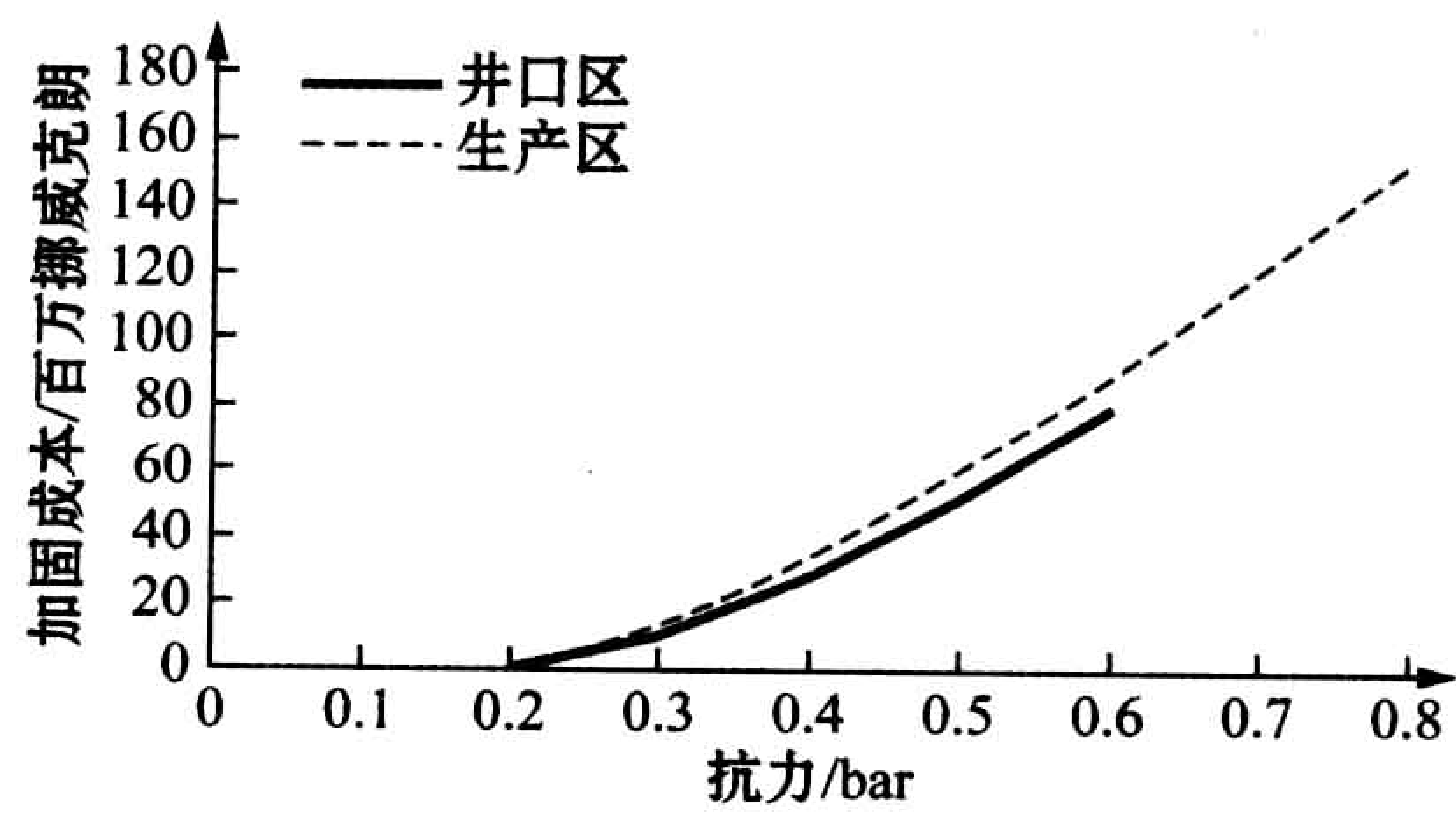


图 9.20 井口区和生产区结构的加固成本

固所增加的额外成本。这些成本是与实现基线抗力 0.2bar 相关成本之外增加的部分。

图 9.20 同时显示为了能够承受更高爆炸冲击载荷而对生产区结构进行加固所增加的额外成本。这些成本是与实现基线抗力 0.2bar 相关成本之外增加的部分。相比井口区,生产区的成本会更高一些。

水下泄露造成的气体云引发需考虑的爆炸冲击载荷概率为零,无需进行过压保护。

9.6.7 优化 Optimisation

根据图 9.20,如果所有甲板都加固成可以抵抗相同的过压(0.45bar),则加固的总成本是 8 300 万挪威克朗。其中,井口区的成本是 3 860 万挪威克朗,而生产区的成本是 4 440 万挪威克朗。对成本的优化可以通过以下措施实现,同时可参见表 9.5。

- 假设井口区的加固水平决定:
  - 该区域内结构的故障频率;
  - 结构加固相关的成本。
- 从而可从式 9.6 得出生产区所允许的故障频率。通过这个故障频率,可得出生产区的如下信息:
  - 所要求的结构加固水平;
  - 跟加固相关的成本。
- 以上步骤不断重复,得出井口区新的加固水平,以确定成本函数的变化。

表 9.5 在井口区和生产区的甲板最优结构加固

井口区抗力/bar	井口区成本/百万克朗	井口区故障频率	生产区故障频率	生产区抗力/bar	井口区成本/百万克朗	总成本/百万克朗
0.3	10.00	$6.00 \cdot 10^{-5}$	$4.00 \cdot 10^{-5}$	0.77	145.56	155.56
0.4	28.28	$3.75 \cdot 10^{-5}$	$6.25 \cdot 10^{-5}$	0.69	115.78	144.07
0.45	38.62	$2.02 \cdot 10^{-5}$	$7.98 \cdot 10^{-5}$	0.45	44.43	83.06
0.5	51.96	0.00	$1.00 \cdot 10^{-4}$	0.34	20.53	72.49

这些数值说明井口区增加的成本大大低于生产区增加的成本。如果能将系统总故障频率不分配生产区，就可以使所增加的成本最小化。

图 9.21 清楚地说明了在不同区域进行加固所带来的成本差异。当井口区的结构加固增加时，总成本将持续降低。

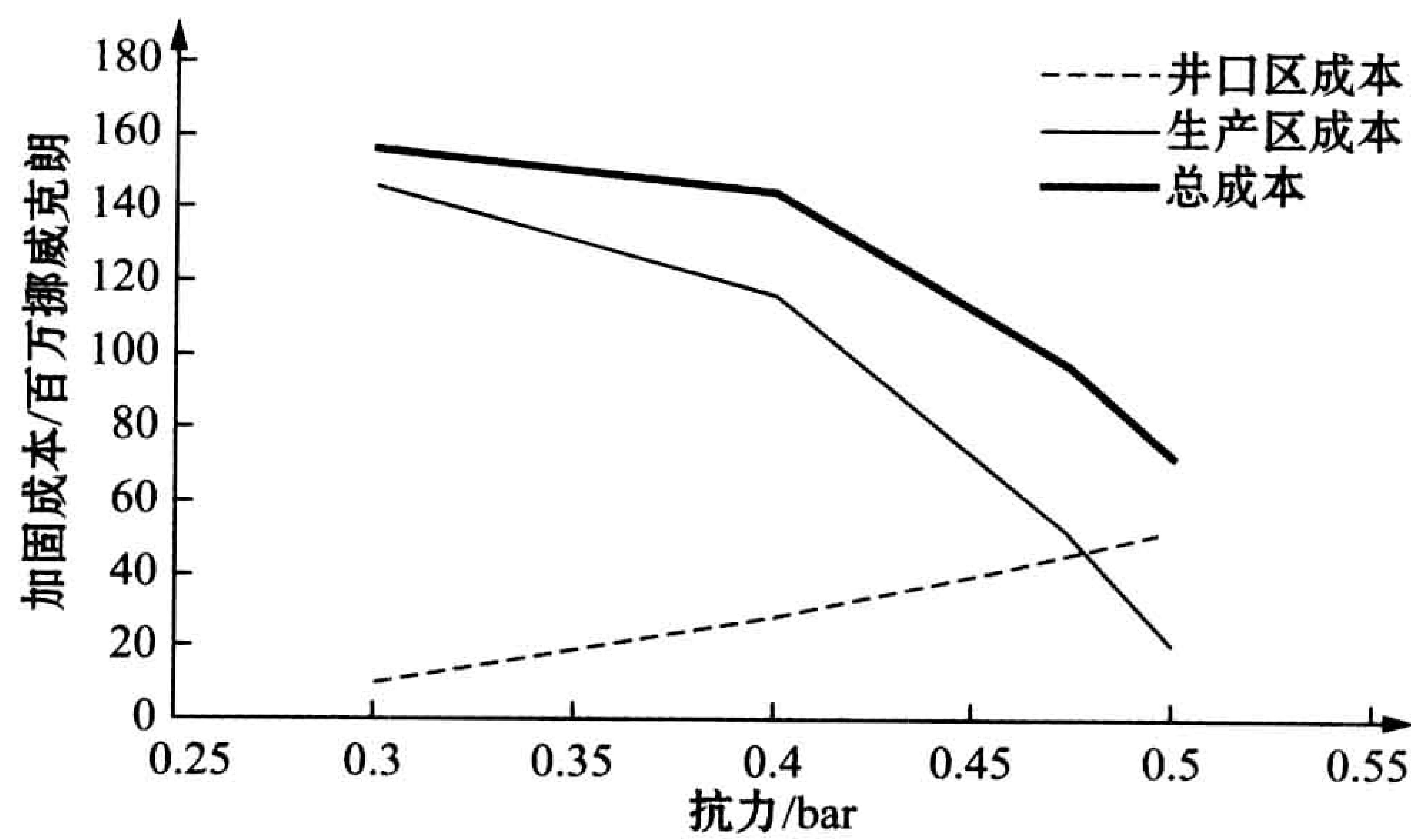


图 9.21　井口区和生产区的甲板结构加固的分项成本

9.7　案例研究：降低爆炸冲击载荷 Case Study: Reduction of Blast Load

此案例研究集中于降低生产平台半密闭甲板空间内部的爆炸冲击载荷。爆炸载荷的严重性可以通过量化风险评估来记录，而量化风险评估法强调需要对潜在的爆炸载荷进行更详细的研究。在量化风险评估中，不同强度的爆炸冲击载荷有以下几种可能的效果：

- 生产设备的破裂，引发大量可以使事故加剧的燃烧源；
- 安全系统的损伤已经达到无法防止事故加剧的程度（如帕玻尔・阿尔法"号平台）；
- 结构损坏直接导致事故加剧。

量化风险评估中实际上已说明很有可能出现高过压情况，因此爆炸是引起事态加剧从一个甲板传递到另一个甲板的最主要原因。

此类型事态加剧涉及的损坏机理非常复杂，而且已进行的建模工作相对有限。在 Eknes and Moan(1996)中讨论了由爆炸冲击载荷引起设备损坏的物理建模。与此相关的量化风险评估研究中，得出了如下的粗略假设：

- 过压超过 0.3bar 时，将引发的事态加剧情况为其他设备破裂；
- 过压超过 0.5bar 时，将引发的事态加剧情况为甲板和墙体的结构损坏。

这些数值会频繁进行使用。然而，应当注意，近来的研究工作已经表明，这些估计值可能有些保守。

因为事态加剧的可能性看起来非常高，因此对补救措施的研究也已经展开，包括如下考虑因素：

- 移除不使用的设备；
- 移除部分外墙。

移除设备所带来的潜在过压降低量相当低。因此后文将不再详述。移除部分外墙（瓦楞轻钢板墙，在靠近地板和屋顶的位置带有风口）的情况将在下文中讨论。还应注意，移除部分外墙意味着改善了自然通风效果，这在下文中也略有涉及。

9.7.1　布局与几何形状 Layout and Geometry

在原先考虑的配置中，平台共有 3 个甲板。底甲板和主甲板的一部分被外墙环绕，而上甲板则是完全敞开。甲板尺寸大约是 70×50m。甲板的 3 侧都有常用的防风雨面板覆盖，但甲板朝北的一面被一排设备隔离。

生产区的围墙（除了防火墙）主要由相对较轻的瓦楞钢板组成。在甲板和屋顶的水平面上，有一些狭窄的水平开口（0.3～0.5m）。这些缝隙用于提供自然通风以达到通风目的。然而，应当注意，通风量并不是非常大。因此，一个自然的解决办法是将外墙开口，以提供更好的通风，同时也可以降低爆炸过压。

9.7.2 分析的案例与配置 Cases and Configurations Analysed

在考虑移除外墙的效果时，使用了两种类型的模型。这些模型基于如下情形：

- 在特定区域内的化学计量混合气；
- 实际的气体云配置，基于对特定泄漏源和环境条件下的气体散布建模。

由于案例的定义必须简单明了，且计算量必须有所限制，所以在气体爆炸研究中经常使用化学计量气体云。人们也认识到这种方法比较保守。保守程度可以概率方法进行研究。

提及的案例研究也考虑了如下措施的效果：在大的防火区域安装一个防火墙，将该区域划分为两个更小的防火区域。同时还考虑了移除部分外墙所产生的效果。对在底甲板和主甲板的爆炸研究包括如下内容：

- 底甲板，部分外墙移除前和移除后的情况对比；
- 主甲板，如下几种情况的过压对比：
  - 整个甲板在用防火墙隔离以及移除甲板之前；
  - 区域 1 在防火墙隔离后和移除外墙后；
  - 区域 2 在防火墙隔离以和移除外墙后。

9.7.3 通风效果 Ventilation Results

移除部分外墙的效果通常是为了提高通风量，这将带来如下效果(除了降低过压载荷之外)：

- 由于气体云被大量稀释，降低了起火可能性；
- 降低了少量气体泄漏时自动气体探测的有效性；

● 人员更直接地暴露在恶劣环境中。

当考虑移除部分外墙是否可行时，其中一个主要的考虑因素是平衡改善通风、降低过压和工作环境条件恶化之间的关系。恶化的工作条件也可能会影响到事故发生的可能性产生影响。改善通风并不总是最重要的目标。

图 9.22 说明了通过外墙改造可以改善通风量，即在同样的时间段内，模块每小时换气量更大。

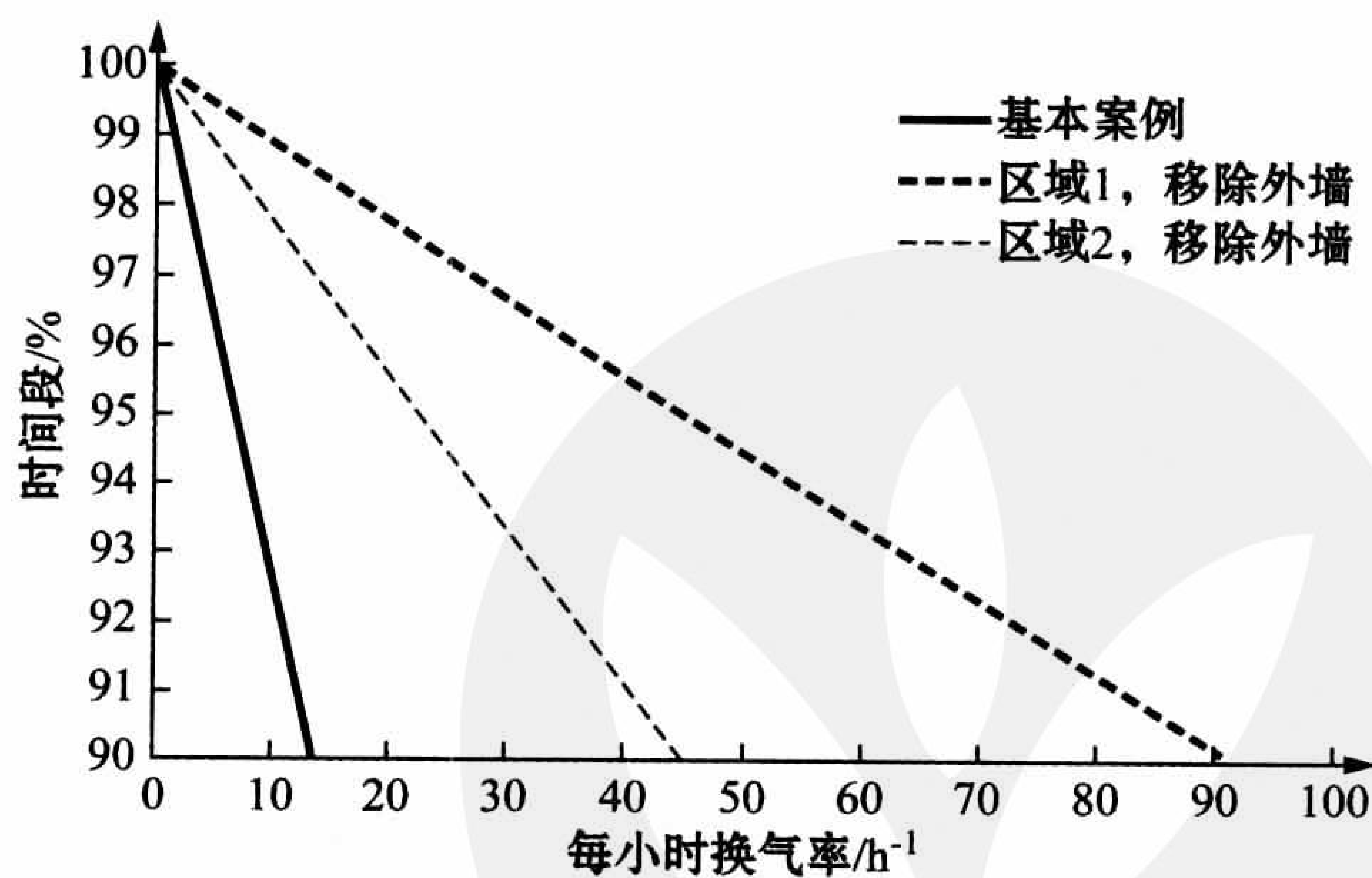


图 9.22　主甲板移除外墙带来的通风改善

这张图是由对平台结构运行计算流体力学计算方法而得出，以确定在不同环境条件下的通风量分布。补充说明，底甲板的计算结果和主甲板区域 2 的计算结果类似。

在定义合适的通风量时，还没有一个通用可行的标准。一些操作员规定，在 95％的时间内，每小时必须至少进行 12 次换气。增加墙体开口面积有助于更轻松地达到此标准。

9.7.4　爆炸研究
Explosion Studies

爆炸研究有 3 个目的：确定需要降低多大的爆炸风险；如何实现降低目标；改善量化风险评估建模。基本方法涵盖以下内容：

- 对化学计量甲烷-空气的爆炸(FLACS)研究：
  - ○ 区域和模块内完全充满的情况；
  - ○ 区域和模块内部分充满(50%和 25%)的情况。
- 对气体云的 FLACS 研究,其中气体云来源于真实气体泄漏情况的气体散布研究。

这些研究都利用当时现成的 FLACS 版本“FLACS 1994”完成(见附录 A 软件概述)。顶边结构爆炸冲击与消防工程(BFETS)试验项目(SCI, 1998)获得的经验已明确表明,该版本不足以预测最可能的爆炸冲击载荷。因此,在几年之后,人们又使用 1998 版的软件对起始所选案例再次进行了研究。1998 版结合了第 9.5.2 节中提及的大规模试验结果。对比 1994 版和 1998 版的试验结果,增加量跟试验场景非常相关,但典型值都在 50%至 150%之间。

9.7.5 FLACS 的分析结果 FLACS Results

下文列出的结果是基于 1994 版的 FLACS 软件。依据 FLACS 结果的讨论可得出如下结论：

- 局部过压最大可达到墙体、甲板等结构上的平均压力的两倍。
- 化学计量场景和气体散布场景之间的过压差别非常明显。墙体、甲板和屋顶的平均压力比化学计量模型的高出 50%,而区域内较小房间的平均压力则几乎增加了 290%。
- 如果从与现实相符的程度来看,基于散布分析的计算是更加优选的方法,但是这种计算方法所要求的计算能力和时间都非常可观(最多几个小时的计算时间),因此很有必要对这种方法的计算量进行限制。
- 基于化学计量气体云的计算方法更加适合研究替代物的相对效果。需要完成更切合实际的散布计算以定义量化载荷。
- 化学计量和气体散布模型之间的差异取决于局部效果。
- 移除部分外墙的效果在主甲板上最为明显,而底甲板上的效果则比较有限。这可能是因为底甲板的区域面积大于主甲板。人们认为,爆炸排气墙围绕的面积越小,效果越显著。对于较大的区域,湍流和加速度会使

压力在压力波到达排气墙之前即已增加到很高的值。

9.7.6 参数敏感性示范 Demonstration of Parameter Sensitivities

本小节研究参数敏感性，它可以显示出参数微小变化所带来的效果。本小节的目的是显示如何通过安装防火墙而将一个生产模块从更大的生产区中隔离出来。应当注意，在模块和平台剩余区域之间，两侧都应留有 1m 的间隙。模块的另外两侧用于通风，因为它们朝向平台外。

图 9.23 和下文给出了使用 1994 版 FLACS(老版本的 FLACS 软件)所完成的分析结果。

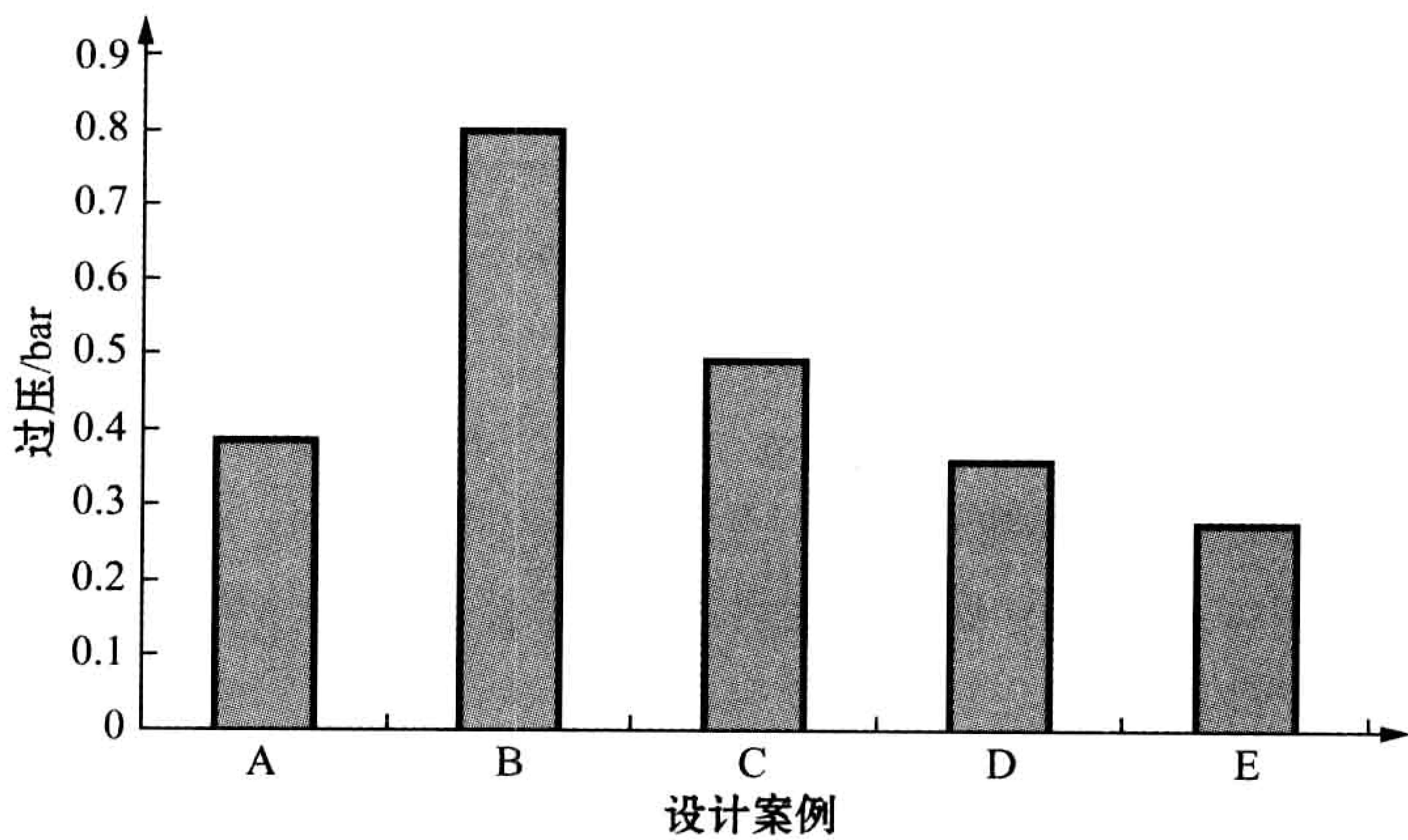


图 9.23　过压结果对比

A. 基本案例，未安装防火墙，外墙相对比较完整；

B. 模块安装了防火墙，外墙无变化；

C. 在风口另一侧的相邻模块安装了防火墙，外墙无变化；

D. 和案例 C 类似，但是减少了外墙面积，以增强爆炸排气效果；

E. 和案例 D 类似，但是外墙开口更多，以增强爆炸排气效果。

不同的设计案例可参见图 9.24。所考虑的生产模块位于图中的东南角。

该模块西面是一个没有内部墙体的敞开式生产区。

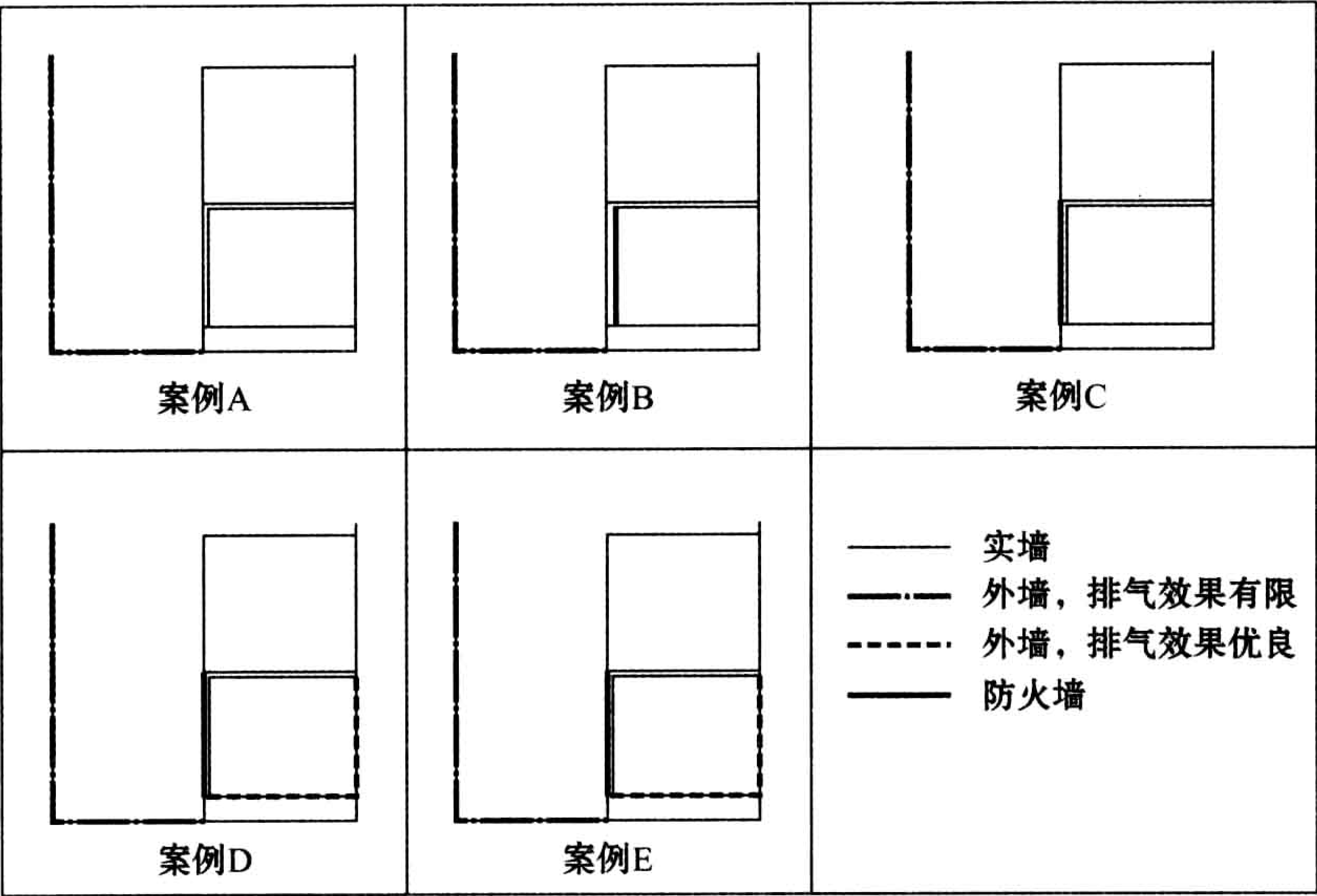


图 9.24 墙体位置概览

9.7.7 量化风险评估建模的含义 Implications for QRA Modelling

0.3bar 时，会引起邻近设备发生破裂，造成事态加剧；0.5bar 时，会引起甲板破坏而造成事态加剧。最大过压的降低也会降低事态加剧的条件概率。过压超越的条件概率由 SERA 软件（或类似软件）确定，是量化风险评估的一个输入条件。

图 9.25 给出了典型的超标曲线，包含外墙改造之前和改造之后的基本情况。

随着过压的降低，设备事态加剧的概率从 90%降低到 57%，而整个甲板事态加剧的概率从 70%降低到 10%。应当注意，该曲线的形状跟局部效果非常相关。因此，过压降低值并不是通用的，而是与特定情形非常相关。因此可以看出，如果最大过压降低了 50%，则意味着出现如下的降低效果：

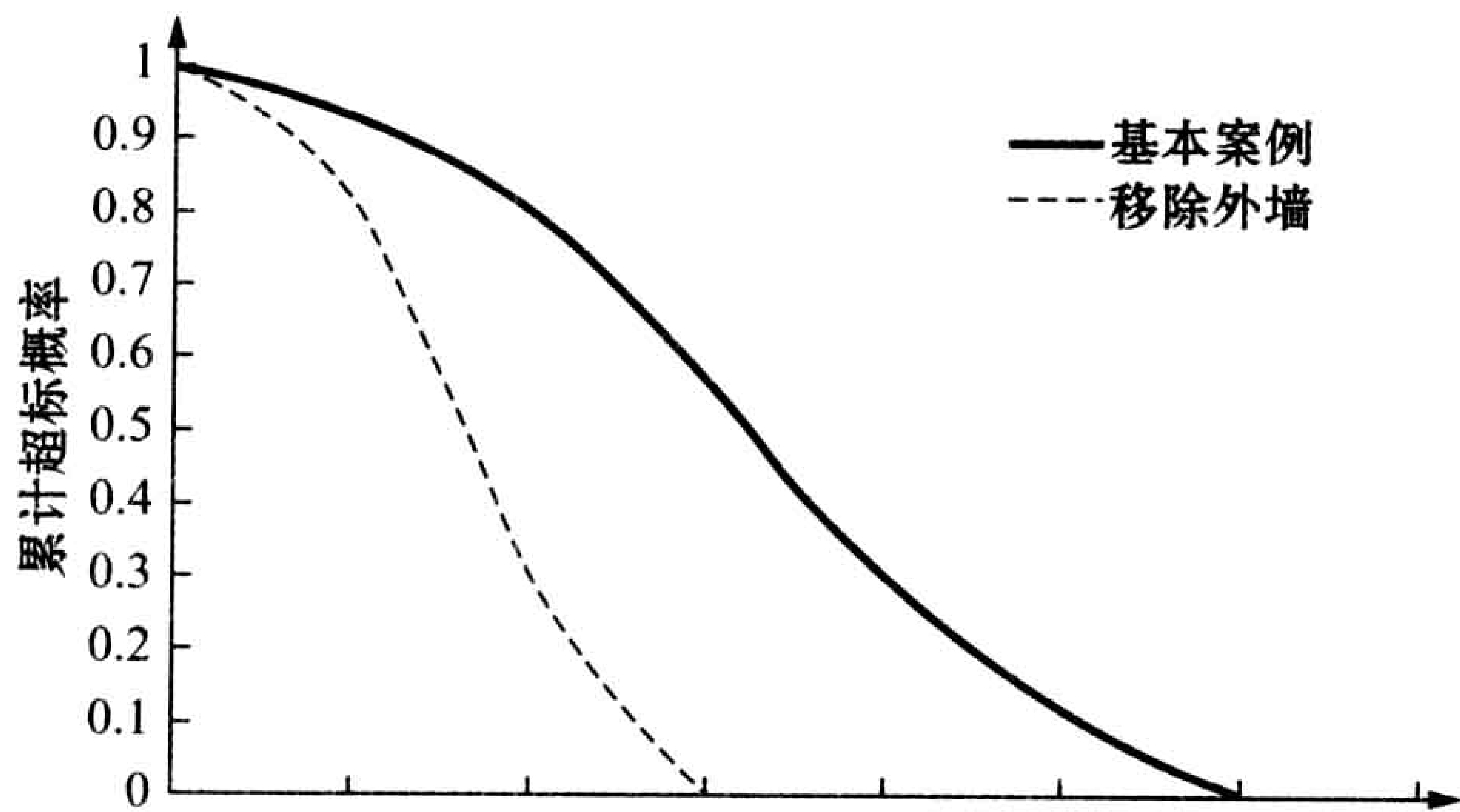


图 9.25　爆炸过压的条件概率分布

- P(设备事态加剧)：37%；
- P(甲板事态加剧)：86%。

它们的降低效果都非常显著，这也意味着爆炸对人员造成的风险也可以通过外墙改造而显著降低。

9.7.8　量化风险评估的敏感性结果 QRA Sensitivity Results

根据这些过压结果，以下平均值可作为相应甲板和区域计算的输入条件：

- 底部　　　　最大过压降低了 20%；
- 主区域 1：　最大过压降低了 50%；
- 主区域 2：　最大过压降低了 50%。

表 9.6 给出了由外墙改造带来的爆炸过压降低所导致的风险水平变化。与生产系统事故相关的潜在人命丧失(PLL)明显降低。然而，此类事故对总体风险的影响极为有限，所以潜在人命丧失的总降低量并不是非常大。

表 9.6 外墙改造对风险参数的影响

风险部分	风险变化量/%
由生产事故引起的潜在人命丧失数值	40%
总的潜在人命丧失数值	5%
一个模块的损坏总频率	2%
数个模块的损坏总频率或者是全部损失	40%

数个模块损坏或平台全部损失总频率的降低量非常可观。这是由于爆炸过压降低,从而降低了其他区域的事态加剧概率。

9.7.9 讨论与评价 Discussion and Evaluation

本案例所讨论的风险降低措施的总成本约为 400 万挪威克朗。整个油田生命周期内的风险降低总量约为 0.05 死亡率,这意味着每条生命挽救的统计成本是 8 000 万挪威克朗。这显然不是一笔小数目,但仍处在经营公司承诺的每条生命的挽救成本范围内。

对资产风险的简化评估可能集中于最大的后果,也就是数个模块的损坏或全部损失。假设每起事故的平均事故成本是 10 亿挪威克朗,如果采用净现值法进行成本累积,那么整个油田生命周期内的成本降低的预期数额为 1 000 万挪威克朗。这更加说明外墙改造的确是一项非常有效的风险降低措施。事实上,降低爆炸过压是一个改造量很小但对人员风险效果却很显著的措施,同时执行成本也不会太高。

应当注意,外墙改造的确会显著降低风险等级,但图 9.25 中的曲线形状也会强烈影响降低效果。这些曲线都是“低弯度”S 形形状。如果这些曲线都是高弯度 S 形,即降低速度更快,风险等级的降低效果相对而言会小一些,但很可能依旧显著。

第 10 章　碰撞风险建模

Collision Risk Modelling

离岸平台与其供给船之间的接触是最经常发生的碰撞事故，一般只会导致轻微的损坏，但偶尔也有报道称撞击强烈。外部非平台相关船舶引发的撞击最主要取决于事故发生地点。这一点在常规的设计标准中没有得以体现，因为这些标准一般不考虑非离岸交通的撞击。人们认为这类危险的级别可能相差很大，这主要是指碰撞的概率取决于事故发生地点，而不是碰撞的后果取决于事故发生地点。此外，碰撞概率或多或少（但并非全部）要受到所采用概念的影响。

任何结构的设计除了需要应对冲击载荷造成的连续坍塌的危险外，还要符合一些其他设计要求。这些要求也规定了平台的设计标准和尺寸。这就意味着在发生撞击时，相对于设计下限，平台可以拥有更多的额外承受能力，因此可以有大量的冗余能力来抵抗碰撞。这种冗余能力取决于所采用的概念，即使对于看似相同的概念，冗余能力也可能有很大差异。

10.1 历史上的碰撞风险 Historical Collision Risk

10.1.1 重大碰撞事故 Significant Collisions

根据世界离岸事故数据库（WOAD®）（DNV，1998a）的记载，自 1980 年起，一共发生了 6 起因碰撞或“接触”（来自密切关注船舶的撞击）而造成平台全损的事故：

- 美国墨西哥湾的两个导管架结构由于碰撞（作为触发事件）而损失。
- 中东水域的一个导管架结构由于碰撞（作为触发事件）而损失。
- 美国墨西哥湾的一座自升式钻井平台在移动中损失，原因是横倾、结构性损坏、与平台发生接触并最终失去浮力。
- 北海的一座自升式钻井平台结构因与码头碰撞而损失。这起事故发生

在恶劣的气候条件下，损失的是一座小型自升式钻井平台，因此不具备代表性。当时这座自升式钻井平台正在距离码头仅数米处的水域中进行隧道挖掘作业。它的体型较小，不是典型的离岸自升式钻井平台，因此不对这起事故进行深入讨论。

- 南美水域（大西洋沿岸）的一座自升式钻井平台结构因与母船发生接触而损失。

值得注意的是，尽管北海曾经发生过数起几近坍塌的事故，但是以上所述事故中却没有一起发生在北海。有报道称，北海的一座自升式钻井平台曾受到一艘全速行驶的供给船撞击（船舶在最后时刻试图进行规避操作，导致了所谓的“侧面擦碰”）。其中的一根垂直支柱对另外 3 根腿柱中的两根垂直构件和 5～10 根的斜向构件造成了重大损坏。所幸当天海面平静，平台的拆除工作进行得井然有序，无人员受伤。

如果我们转而关注因碰撞和接触造成的致命事故，那么船员显然就是危险人群。在 1980 年后发生的 5 起事故中（DNV，1998），1 起事故中有 2 人在（南美海域，太平洋海岸）导管架结构物上死亡，其他 4 起事件中共有 23 人在船舶上死亡。这其中有 2 起发生在美国墨西哥湾，1 起发生在南美（太平洋），1 起发生在中东。

10.1.2 挪威平台碰撞 Norwegian Platform Collisions

挪威北海上虽然没有发生过严重的碰撞事故，但是发生过一些严重程度一般的事故和近距离停靠事故。以下为挪威北海上发生过的碰撞事件（与离岸船舶的轻度接触不包括在内）：

- 1988 年：奥斯博格 B 号导管架平台与潜水艇碰撞；
- 1995 年：小型沿海货船正面撞上诺派普 H-7 号平台；
- 2000 年：穿梭油船撞向浮式生产储卸装置（见第 4.16 节）；
- 2004 年：大型供给船高速撞上移动海上设施；
- 2005 年：大型供给船撞向两座埃科菲斯克平台间的连接桥。

第二个事故实际上并非发生在挪威境内，而是在德国。事故平台从挪威出发，是埃科菲斯克到艾姆登的诺派普管道系统上运行的压缩机站。

挪威北海上还发生过多起平台与供给船间的轻微接触以及穿梭油船在离岸装载时与浮式装载设备的碰撞。此外，还有多起船舶横漂和碰撞的事故，但是最终都没有撞击海上设施。最后还有多起几乎发生并且有可能导致严重正面碰撞的事故，其中一些发生在挪威海的哈尔滕班肯地区。在第 11.4 节中将讨论浮式生产储卸装置和穿梭油船的碰撞事故。

10.1.2.1 奥斯博格 B 号导管架平台碰撞 Oseberg B Collision

奥斯博格油气田的潜水艇碰撞事故发生在 1988 年 3 月 6 日，当时西德的 U27 潜水艇撞上了奥斯博格 B 号钢导管架平台。平台上的人员被疏散至“复信(Polyconfidence)”号浮式住宿船上。浮式住宿船与平台之间有旋梯相连。事后的调查发现直径为 1.2m 的支撑架上产生了约 20cm 深的凹陷。如果未发生此次撞击，修理工作完全可以推迟到夏季再进行，而最终这次修理花费了约 8000 万挪威克朗。当时潜水艇在海面以下深约 20m 处航行。虽然地图上标有平台的位置，但是潜水艇并没有接受到声呐信号。潜水艇的船艏门、舰桥和导航设备均遭到损坏，但无人员受伤。

10.1.2.2 诺派普 H-7 号平台碰撞 Norpipe H-7 Collision

商船与诺派普 H-7 号平台的正面碰撞发生在 1995 年 9 月 30 日，当时一艘小型的(273GRT)德籍船舶“雷因特”号正在开往丹麦的奥尔堡市途中。平台上的工作人员直到最后阶段才发现商船即将正面撞向平台。平台的守备船曾试图去碰触商船，但没有成功。守备船又试图拦截商船，但商船依然继续前进。随后于 10∶42 之际，在商船以“侧面擦碰”的方式撞击平台的一根腿柱前，平台上启动了关闭程序。平台仅遭到轻微损坏，没有出现人员受伤和溢油。但船舶的桅杆被撞得粉碎。平台的两边各有一根大型立管，这意味着此次事故的后果本来有可能十分严重。但是事故发生时，商船与平台间的距离还没有近到可以撞上立管。事后发现，事故发生时，商船正处于自动驾驶模式。

10.1.2.3 “西部风险”号平台碰撞 West Venture Collision

2004年3月7日午夜时分，一艘刚履行首份合同仅几个月时间的供给船直接撞上了“西部风险”号移动平台角上的塔柱。这艘船的排水量约为5 000t，速度7.3kn，因此这次撞击的能量巨大。

塔柱内的两个压载罐被刺穿，但是因为开口在海平面之上，所以没有进水。平台发生了约7m的侧移，防喷器悬挂在了300m长的立管上，但并非位于离其他设备很近的位置。

供给船的船艏产生了约1.5m的凹陷，球鼻首也遭到损坏。平台上117名工作人员和船舶上14名船员无一受伤。移动平台和船舶也都依靠各自的推进系统驶向海边接受检修。

事故的主要原因是“远交响(Far Symphony)”号守备船在驶向平台时没有解除自动驾驶状态。由于启动了自动驾驶，舰桥上的船员无法以正常方式操纵船舶。自动驾驶系统虽然没有将海上设施作为路径点，但是由于风浪的原因，未及时纠正航向绕航。当班船员在进入安全区域前没有测试操纵系统。船员对于应急操纵设备的使用也不熟悉。

10.1.2.4 埃科菲斯克中心区域碰撞 Ekofisk Centre Collision

这次碰撞发生在2005年6月2日，当时海上浓雾弥漫，能见度在100～150m之内。守备船全速驶向埃科菲斯克油气田的两座平台之间的连接桥。船舶的排水量为5 600t，速度为6m/s，这意味碰撞时能量等级很高。两座平台之间的连接桥遭到了船舶上层建筑的撞击。连接桥因而无法继续使用，但幸运的是，碰撞造成的损失相对较小。如果是连接桥末端的小型钢导管架平台被撞击，这就可能变成一起全损事故。而这座平台在20世纪90年代末就不再运行，碳氢化合物已被清除干净，因而它已不再“存活”。

在守备船到达埃科菲斯克油气田之前，连接桥上刚进行了船员轮换，轮换时沟通失误正是碰撞发生的直接原因。

10.1.3 母船碰撞
Attendant Vessel Collisions

之前,关于母船碰撞事故最全面的研究是J·P·肯尼关于保护海上设施不受撞击的研究(Kenny, 1988)。这项研究应英国能源部的要求而开展,分析了1975～1986年间能源部所记录的碰撞事故。

在此之后,健康与安全管理局(HSE)也发布了针对自身数据库记录的所有碰撞偶发事件和其他部分数据库中记录的碰撞偶发事件的分析报告。最新的报告中记录了1975年到2011年10月31日间的数据(HSE2003)。报告中共涉及了557起碰撞偶发事件,其在不同类型船舶上的分布如下:

- 供给船:353起,占63.4%;
- 守备船:87起,占15.6%;
- 其他母船:74起,占13.3%;
- 过往船舶:8起,占1.4%;
- 未指明船舶:35起,占6.3%。

对于母船,我们可以得出10年间的偶发事件趋势:

- 1975～1984年间:218起;
- 1985～1994年间:211起;
- 1995～2001年间:85起。

如果我们忽略未指明船舶偶发事件,母船偶发事件总共514起,占总数的96%。即使因2002～2005年间数据缺乏导致最后一个统计阶段要短一些,但是1995年后偶发事件减少的趋势还是显而易见。报告中也给出了设施年数,由此可以计算出每座设施每年的事故频率:

- 供给船:0.010次/设施年;
- 守备船:0.0030次/设施年;
- 其他母船:0.0038次/设施年。

相比之前J·P·肯尼研究的数据，这些频率几乎下降了一个数量级。如果我们考虑海上固定和移动设施的差别，可以预计，因为海上移动设施拥有两个浮式结构，因而发生碰撞的频率将更大。以下 1995～2001 年间的频率数据与这个预测相吻合：

- 海上固定设施：0.026 次/设施年；
- 海上移动设施：0.102 次/设施年。

碰撞事故起因的总体和具体分布可以得出，以下是主要类别的总体分布：

- 外部因素：82 起，占 14.7%；
- 机械控制故障：126 起，占 22.6%；
- 人为控制失误：152 起，占 27.3%；
- 瞭望失误：15 起，占 2.7%；
- 未明原因：182 起，占 32.7%。

10.2 建模概述 Modelling Overview

10.2.1 引言 Introduction

评估碰撞风险模型的第一步是将需考虑到的船舶进行具体分类。表 10.1 和表 10.2 是可能对（固定或移动）离岸平台造成碰撞危险的船舶分类。

表 10.1 风险建模中涉及的外部船舶类别

交通类	船舶类	备 注
商业	商船	经过某一区域的贸易交通
海军交通	水面船舶	包括战舰和潜水艇
	水下船舶	水下潜艇

（续表）

交通类	船舶类	备　注
捕鱼船	捕鱼船	分为经过船舶和区域作业船舶
离岸交通	守备船	往返于其他油气田的船舶
	供给船	往返于其他油气田的船舶
	离岸油船	往返于其他油气田的船舶
	拖船	用于拖拽钻机、浮式住宿船等

在后续章节中将介绍各种船舶类型，同时对相关交通模式和船舶特性进行评估，为相关的碰撞概率模型讨论提供依据。Haugen(1991)对于模型做了更广义的描述。以下将介绍的模型是：

- 过往船舶的碰撞模型；
- 漂移浮式平台的碰撞模型。

表 10.2　风险建模需考虑的与碰撞油气田相关的交通类别

交通类	船舶类	备　注
离岸交通	守备船	专用守备船
	供给船	来访供给船
	工作船	提供特殊服务/支持的船舶，例如潜水船、锚泊船等
	离岸油船	来访的穿梭油船
浮式单元	储油船	油田专用浮式单元
	浮式住宿船舶	
	钻探单元	
	浮吊	

10.2.2　商船
Merchant Vessels

商船经常意味着最严重的危险，主要因为：

- 体型较大，因而冲击能量巨大。
- 通常航速较快，因此几乎任何类型的商船都意味着巨大的冲击能量。
- 某些区域交通繁忙。

- 相对于进行油气开发勘探的其他船舶和平台而言，商船可谓是海洋的“老”用户。海上世界的惯例是航行自由，管制最少，而船东们通常并不愿意接受对商船采取的管制措施。

最后一种情况在近 15 年来有所改善。海上交通管制现在已经越来越普遍，监督体制也使船舶营运变得更加透明。这已促使商船船队更易于接受管制措施。

商船很少引起碰撞事故。勿庸置疑，这是个好消息，但是同时却也意味着可用于风险分析的历史数据有限。因此对于风险的预估也存在众多的不确定因素。

过往船舶的航行失误经常被称为“动力”碰撞，也就是船舶向与平台发生碰撞的方向行驶。这种情况又可以进一步分为：

- 船舶失灵：在能见度较差的条件下，由于雷达故障或者操作错误使船舶处于无效值班状态；
- 船舶失控：由于值班员离岗、注意力分散、不称职或任何其他形式的不当行为导致船舶值班无效。值班无效必须持续一段时间（至少 20min）才可以认定船舶失控。

10.2.3　海军交通 Naval Traffic

在 1988 年的碰撞事故之前，人们认为海军船舶在航行中总是处于最佳控制状态，因此从未对其进行风险分析。但奥斯博格事故则在某种程度上推翻了这个设想。然而，海军船舶通常不愿意透露自身或外国船舶的移动信息，这也一直都是海军交通的一大问题。因此，对于海军交通很难进行预估，并且预估时经常或多或少地依靠主观判断。海军交通主要分两类：海面交通和水下潜艇。尽管发生了奥斯博格事故，人们依然认为海军交通不会造成重大危险，原因如下：

- 船舶数量一般相对较少；

- 船舶在技术方面被认为十分可靠,在海上失控横漂的概率很低;
- 配员水平和标准很高,这意味着瞭望人员在岗时没有察觉到平台的可能性较小。

由于海军船舶风险较低,因此在碰撞风险研究中通常不对其进行风险分析。

10.2.4 捕鱼船 Fishing Vessel

捕鱼船的类型可以从大型的工厂船或冷冻船到小型的近海航行船舶。根据捕鱼船的运行模式,可以将它们分为两类:

- 在海边和渔区之间往返的船舶。
- 在某个渔区捕鱼的船舶。捕鱼作业时,船舶的操作和运行情况复杂且多变,但是船速通常较低,且没有偏爱的行驶路线。

捕鱼船一般较小,因此它们不会对平台结构的完整性造成严重威胁。通常一艘大型捕鱼船的排水量约为 1 000t。这意味着在多数情况下,碰撞能量小于 20MJ,漂移和运行中的船舶通常都不会对海上设施的完整性构成威胁。但是,暴露在设备外部的立管和脐带管有可能会因捕鱼船撞击而受到破坏。

10.2.5 离岸交通 Offshore Traffic

10.2.5.1 外部离岸交通 External Offshore Traffic

过往的离岸船舶,包括油船、供给船、守备船和工作船,在很多方面和过往的商船相似。由于这些船舶一直在某一区域内工作,因此对于海上设施更为了解。用于过往船舶的风险评估方法也适用于此类船舶,但是参数值还是会反映出这一类别交通的相关情况。

10.2.5.2　与油气田相关的母船交通 Field Related Attendant Vessel Traffic

此类船舶往返于相关的油气田。此外，它们还会在油气田内停留一段时间。这意味着需要区别两种不同的运行模式。

多数碰撞事故发生时，母船正在平台附近区域进行作业并且航速较低(Kenny 1988)。这些低能量级别的撞击通常不会对配备工作人员的正常运行离岸平台的完整性构成威胁，但对于通常不配有工作人员并且采用新型轻质结构的海上设施而言，可能会发生意外情况，因为这些设备没有与前者具有相同的载荷抗阻能力。一般的设计规范通常可以为低能量级的撞击预留充分的抗力。挪威船级社规范(DNV，1981b)中规定，对于局部损坏，应当可以抵御14MJ 的碰撞能量。

母船的事故数据经常作为评估碰撞频率的依据。但是对于特定的船舶类型、平台设计规格以及其他特定的油田条件，这些数据也需要进行相应的修正。

船舶在向平台靠近时也可能和它发生碰撞。如果一艘供给船正在向平台驶去，但是由于设备故障或人为失误使它没有改变方向或减速，碰撞便有可能发生。对于使用卫星定位导航系统(例如 GPS 等)的船舶，当船舶正在调整驶向海上设施的路线时，如果在最后阶段不能控制好船舶的航向和速度，船舶必定会撞上海上设施。因此，很多操作人员要求供给船的航行终点距离海上设施至少 500m(在安全区外)，以排除与平台发生撞击的风险。

历史数据表明，正在向油田行使的母船具有很大的风险。因此，一份完整的碰撞风险研究报告中必定会包含此类碰撞事故。

10.2.5.3　与油气田相关的穿梭油船交通 Field Related Shuttle Tanker Traffic

穿梭油船在装油时完全依靠它的推进系统。相对于其他船舶，油船的漂移频率基于主机故障的概率。

为了避免漂移向海上设施，油船会在平台的下风口位置进行作业，因此它们在油田内等待装载时发生撞击的概率通常很小。

10.2.6 浮式单元 Floating Units

最后一类是平台和浮式单元之间的碰撞。浮式单元的定义包括了浮式住宿船、钻机、浮吊、拖船、储油船、潜水船以及油田内正在装油的穿梭油船。浮式单元可以由系缆或动态定位系统或两者的组合来进行固定。如果定位系统失效，浮动单元就可能开始漂移。浮式单元漂移模型主要以设备故障频率和气象条件为基础建立。Safetec(1994)讨论了这一模型，在本书后面章节中将不再描述。

10.3 过往船舶的航行 Passing Traffic

船舶与海上设施之间的碰撞明显和两艘船舶之间的碰撞不同。两艘船舶之间的碰撞往往由于协调通行安全距离失败所造成。而当船舶与海上设施发生碰撞时，只有船舶在移动，海上设施是静止状态。海上浮式设施可以在一定范围内移动，但这跟船舶在动力和船员驾驶下驱使的移动完全不同。浮式生产储卸装置(FPSO)因为可以旋转，可以看成是一个特例。

正是由于这个明显的差异，适用于两艘船舶之间碰撞的模型无法应用于船舶与平台之间的碰撞，反之亦然。下面介绍的动力碰撞和漂移碰撞在很大程度上基于 COLLIDE®模型，参见 Haugen(1991)。

10.3.1 引言 Introduction

当船舶处于漂移状态(即失去控制)，或者船舶正在行驶但船员没有意识到正在驶向平台时，就有可能发生碰撞。这可以表示为：

$$P_{CP} = P_{CPD} + P_{CPP} \tag{10.1}$$

式中：

P_{CP}——过往船舶碰撞的概率；

P_{CPD}——由过往的漂移船舶引起的碰撞概率；

P_{CPP}——机动碰撞的概率。

碰撞概率值通常都非常低，正因为如此，在实际情况中并没有一个经过数值验证的合理碰撞概率。在下文中，上文列出的概率在使用时视为频率。漂移船舶的模型总体上适用于所有交通类别，此处不再进行讨论。下文将考虑动力碰撞的情况。

10.3.2 过往机动船的碰撞——模型概述 Powered Passing Vessel Collisions—Model Overview

10.3.2.1 基本方法 Basic Approach

位于特定位置的平台被过往船舶碰撞的频率的基本计算公式可以表述为：

$$P_{CPP} = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{6} \sum_{k=1}^{n} N_{ijk} \sum_{l=1}^{4} P_{CC,jkl} P_{FSIR,jkl} P_{FPIR,jkl} \tag{10.2}$$

式中：

P_{CPP}——每年过往机动船舶的碰撞频率；

N_{ijk}——每年在船舶类型为 j、船舶大小类型为 k 且在航道 i 中行驶的船舶数量。计算每个相关航道的风险贡献量，加在一起便可得到平台的总风险；

$P_{CC,ijkl}$——当一艘船舶(船舶类型为 j，船舶大小类型为 k，属于交通小组 l 且在航道 i 上行驶)能够目视或通过雷达观测到平台时，这艘船舶正在碰撞航向上的概率。船舶类型可分为以下 6 种：

- 商船；
- 捕鱼船；
- 守备船；
- 供应船；
- 穿梭油船；

● 军舰(包括潜艇);

$P_{FSIR,jkl}$——船舶自身无法启动躲避措施以避免和平台相撞(即船舶初始矫正失败)的概率;

$P_{FPIR,jkl}$——假设在船舶自身未启动躲避措施的情况下,平台或守备船无法成功启动躲避措施(即平台初始矫正失败)的概率。

乍看起来,式(10.2)的每个因素都是不相关的,但实际并非如此。这些概率更应该看成是条件概率,与在事件树中使用的类似(见图 10.3)。这两个失败概率跟特定的船舶、大小和交通类型相关,但与航道无关。

交通容量 N_{ijk} 是最直接的参数。这个参数不需要进行建模,唯一的问题在于需要大量的数据。COAST® 数据库(Safetec, 2002)提供了丰富的最新海运航线数据库,包括整个英国大陆架(UKCS)和挪威大陆架(NCS)数据以及世界各地其他区域的数据,参见附录 A。COLLIDE® 软件使用 COAST® 数据作为计算某个位置碰撞频率的输入条件。

碰撞航向的概率 P_{CC} 是一个"几何参数",它包含了所有跟交通流量的构成和位置相关的参数。

两个因果参数 P_{FSIR} 和 P_{FPIR} 分析当船舶无法采取措施避免碰撞发生时的基本原理。考虑到众多的人员失误及设备故障,需要进行一次可靠性分析。这些数值都非常相关。

10.3.2.2 模型评估 Model Evaluation

COLLIDE® 方法试图尽可能地向船上的领航员说明各种情况,因其责任重大。这个过程可以描述如下:

- 第一步是在驶出港口之前事先进行规划。领航员可能在进行规划之前就已经知道平台的位置,也有可能在规划过程中才清楚,也有可能在规划之后仍不清楚。领航员可能将本次航行过程规划得非常细致,也有可能不这么做。这是一个非常重要的步骤,因为这个阶段决定了船舶在到达平台之前的行为特性。
- 一旦航行启动,所有情形都假设保持不变,直到船舶可以通过目视或者雷达观测到平台。此时的距离会有不同,但是通常为 12nm。从这个时

刻开始，所有船舶将得到同样的“信息”，即所有保持合适观测位置的领航员都能意识到平台的存在。不过，船舶到平台的距离仍然足够远，即使船舶可能直接驶向平台，但领航员此时也不会产生任何担忧。

- 下一个变化发生在当船舶已经离平台很近的时候，此时船舶的航向如果依然没有改变，那就显得非常反常，至少从平台角度来看非常反常。在这个时刻，平台如果注意到了迫近船舶，将期望船舶能够采取一些躲避措施，随着距离的拉近，所剩的时间也将越少。如果从船舶角度来看，碰撞航向可能还是处于“正常”状态，但如果继续保持这个航向，船舶将对平台的船员造成越来越大的威胁。
- 当船舶到达平台之前的最后几分钟内，依然有足够时间进行躲避操作。这被视为最后一分钟的规避措施，可能导致侧面擦碰而不是正面碰撞。

图 10.1 所示为这个过程的不同阶段。在所谓的“早期矫正区域”和“末期矫正区域”之间，风险水平很低，直到船舶进入安全区域。此后风险水平将以指数水平增长。

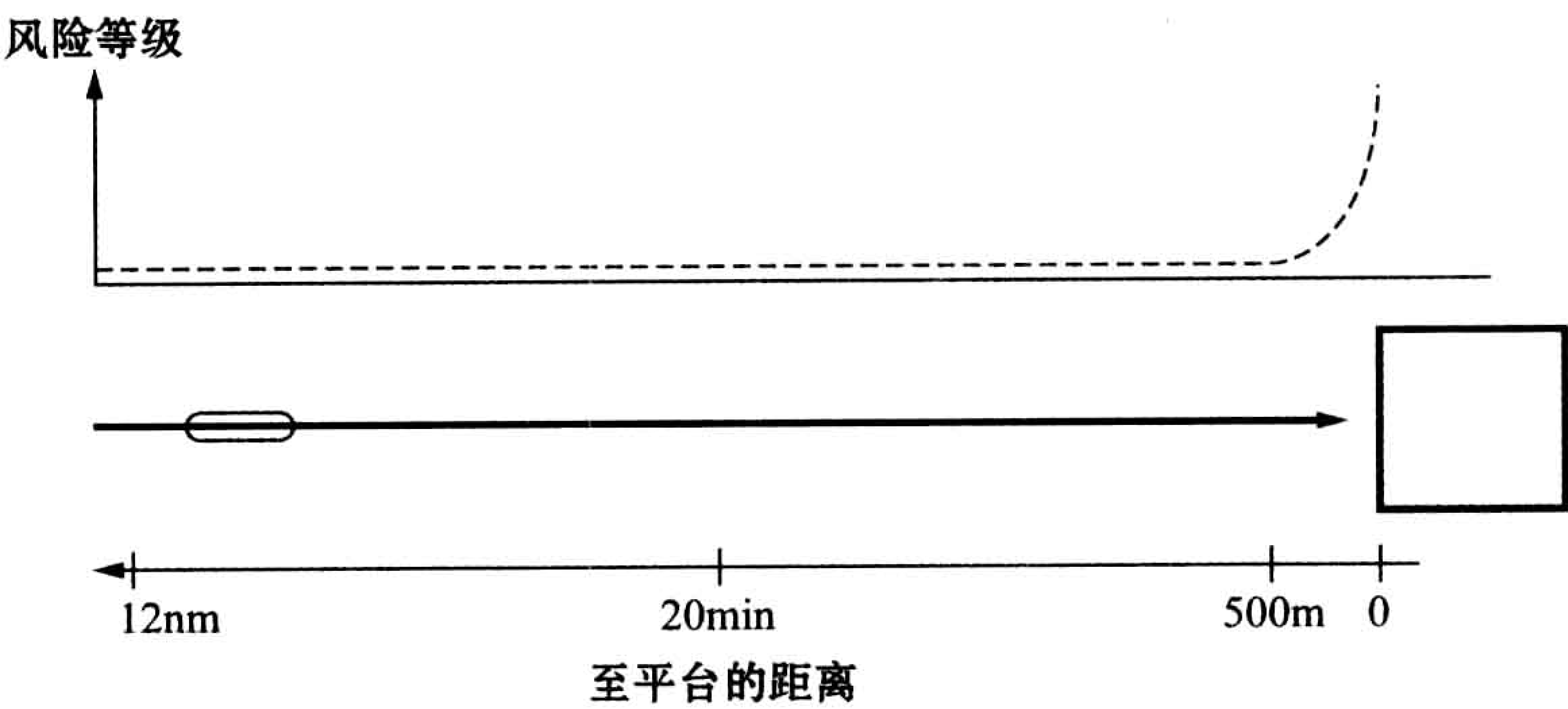


图 10.1　驶向平台的过程示意图

该方法假设领航员的工作非常认真负责，这是该方法令人生疑的一个方面，尽管大部分领航员的确如此。但凡事总有例外，在每 999 名认真负责的领航员之外，就可能有 1 名领航员不太负责，而这位领航员可能会单独占到碰撞风险的 90%。是否可以用认真负责的 999 名领航员的建模结果（只占到风险水平的 10%）来代表这位不负责任的领航员呢？这个问题有点复杂，因为不可能对不负责任的领航员的行为进行建模分析。这个观点可以举出更多的例子，

1995年与H-7压缩平台相撞的“雷因特”号的船长即为其中一例。有报道称，此人在不到10年的时间内卷入了3起违反航海规则的事故或意外事件。

但是还应当考虑与航海过程本身相关的其他方面，包括全球定位系统(GPS)卫星系统和最近由国际海事组织(IMO)强制实施的自动识别系统(AIS)。基于全球定位系统卫星的导航系统10年之前已引入，现在这种系统已非常普及。引入这些系统后，航海过程或多或少有些改变，至少对航海计划而言如此。可能仍有一些小型船舶没有安装全球定位系统。从碰撞危险的角度看，这些船舶可能是“主要隐患”，因为一些船舶的航海技术水平可能较低，他们更有可能卷入事故。而自动识别系统(AIS)则有所不同，因为所有可能对海上设施造成危险的船舶都必须配备该系统(参见第10.3.9节)。

10.3.3 交通模式与交通容量 Traffic Pattern and Volume

交通容量很可能是基于观测得出的最直接参数，它可以用统计方法进行处理，而不需要进行分析思考或工程判断。因此这个参数在建模时所需要花费的精力最少。

上文已经提到过包含碰撞计算日常数据的数据库(COAST®)。更基础的数据来源是劳氏海事情报所的港口日志数据，每天报道世界范围内的船舶运行情况。COAST®采用这个数据作为它的一个主要数据源。除了评估碰撞风险位置的实际观测数值之外，还可以利用港口数据。应当注意，在所有案例中，交通模式和容量经常发生变化。

某个特定航道上的侧向航行模式经常用一个常态分布来描述。如图10.2所示，航道宽度经常被取做4个标准偏差(例如COLLIDE)。还有一些其他的交通分布图，参见Haugen(1991)。

这个模型的一个基本前提是商船通常按照预定航线或航道运行。而这一点已在大量的交通调查中得到证实，这样说明这个假设是合理的。

理想情况下，所有可能的港口间航线组合应当逐个进行确定。这样可以得出一张交通图，而从风险计算的角度非常易于处理，因为所有的航线都已经明确确定。同时它还可以改进数据的可跟踪性，并且提高了更新交通数据的可能性。在航线明确确定的情况下，如果已经收集了足够多的数据，例如按照某个航线“摆渡”这样的情况(即一些船舶在较短的间隔内重复同样的航行航线)以

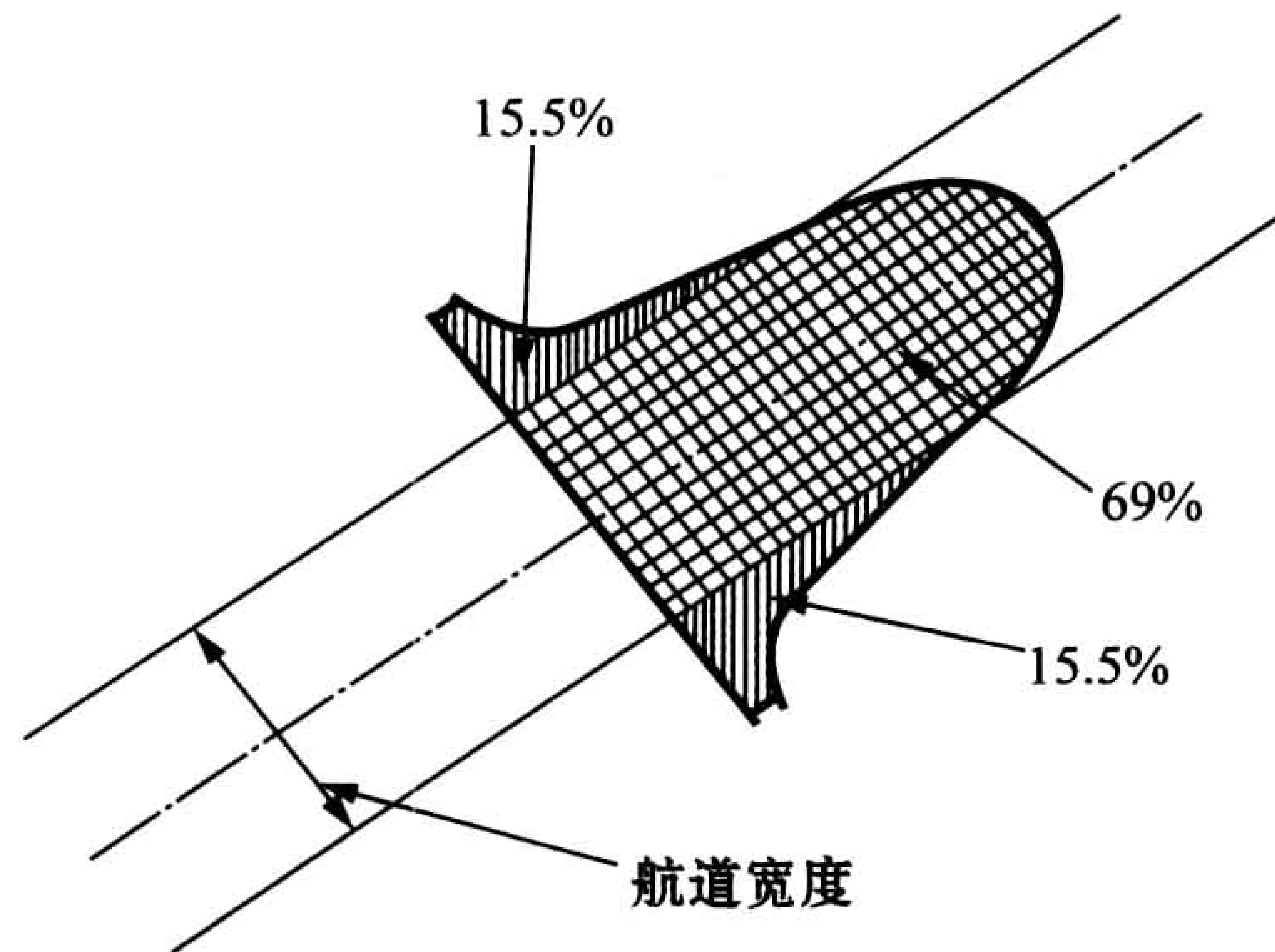


图 10.2　基于航线的交通

及船舶大小类型分布会非常易于控制。

然而，这样也会带来麻烦，因为涉及大量的航线，而其中大部分航线的交通量非常小。此外，并不是所有情况都必须将交通划分至如此细致的程度，因为即使两艘船从不同的港口出发，仍然可以经过一些共同的航路点。这意味着他们可以至少有部分航线相同。在确定航线时将使用到这些航路点。

10.3.4　碰撞航向的概率 Probability of Collision Course

碰撞的基本条件是船舶在碰撞航向上行驶。它假设在平台可以被观测到前就已经进入碰撞航向。如果一艘船舶本来不在碰撞航向上，在观测到平台之后，却将航向变换到正好朝向平台行驶，这种情况几乎不可能出现。因此，正是平台可被观测到的点之前的过程决定了参数 P_{CC}的值。

在北海，船舶的航向直接朝向平台的情况经常发生。挪威石油安全管理局(PSA)的风险等级项目(RNNS)中的数据已经证实这一点。因此如果到平台的距离足够远，这本身就不应被视为危险情况。只有当船舶离平台的距离在不断减小而船舶仍然维持它的航向时，危险才可能发生。本章节中的讨论主要集中在船舶已经通过目视或雷达观测到平台时的情形，此时船舶已经离平台 12nm。

首先讨论经过公海且无特殊障碍物时的航线。此时可以假设交通在航线宽度的分布满足常态分布，这很合理。在两点之间的直接(或理想)航线偏差，

可能由如下因素造成：

- 不同的航线选择；
- 不同的航海实践；
- （人为因素相关的）导航偏差；
- 设备、图表等的偏差；
- 由风向、波浪和海流引起的偏差。

所有这些因素都有一定程度的随机性，可以假设它们综合作用产生的直线偏差可以用一个常态分布来建模。然而这个假设仅与在公海航行相关。

下一步考虑平台的导航效果，因为它会是航线中的一个障碍物。平台在最开始时被认为处于航线中间或接近中间的位置。

交通被划分为清楚平台位置的船舶和不清楚平台存在的船舶两类。后者将持续航行，不受影响，直到发现平台，即达到离平台约 12nm 的位置。对于此类船舶，仍然可以使用正态分布，至少在发现平台和执行相应的躲避措施前可以使用。

剩下的船舶被视为在通过目视或雷达观测到平台之前就已经清楚平台的存在。然而，仍然假设其中的一些船舶将继续航行，就像平台不存在一样，直到已经距离平台足够近且可以确定是否存在碰撞风险。

这样做的主要原因是导航精度（未考虑卫星系统）有限，而且风向和波浪会带来几海里的偏差。虽然在大多数情况下船舶需要非常精确地驶离平台，但由于随机变化的存在，计划航行航线时也不会非常精确地确定。相反，只有当问题出现时才会进行针对性处理。

最后一类船舶是清楚平台位置且进行仔细规划航线以躲避平台的船舶，这将是另一种情况。为了避免进入平台附近的安全区域产生碰撞，在考虑以上讨论的偏差之后，很自然就会将航向确立为距离平台 1～2nm 的方向上。这很像是一个歪斜的分布航线，驶向平台时剧烈下降，而驶离平台却有一条长长的拖尾。

在最后一类船舶中，有一种稍微特殊的组别使用平台作为导航标志物。一些船舶不再使用最短航线，而是设定一个海上设施来进行定位。

这种船舶不能被排除在风险计算之外，因为即使这些船舶计划沿着平台驶过，计划好的航向中仍然存在随机偏差，可能导致这艘船进入碰撞航向。

这些方面适用于那些没有采用 GPS 卫星系统的船舶，大部分船舶都是这种情况。如果采用了卫星导航，那么航向实际上已确定，而不受制于随机变化。这类导航需要在每段航程中选择一个固定的目标位置。

10.3.4.1　事件树模型 Event Tree Model

图 10.3 所示的事件树是评估正在碰撞航向上行驶概率的主要依据。顶事件是船舶驶向平台。

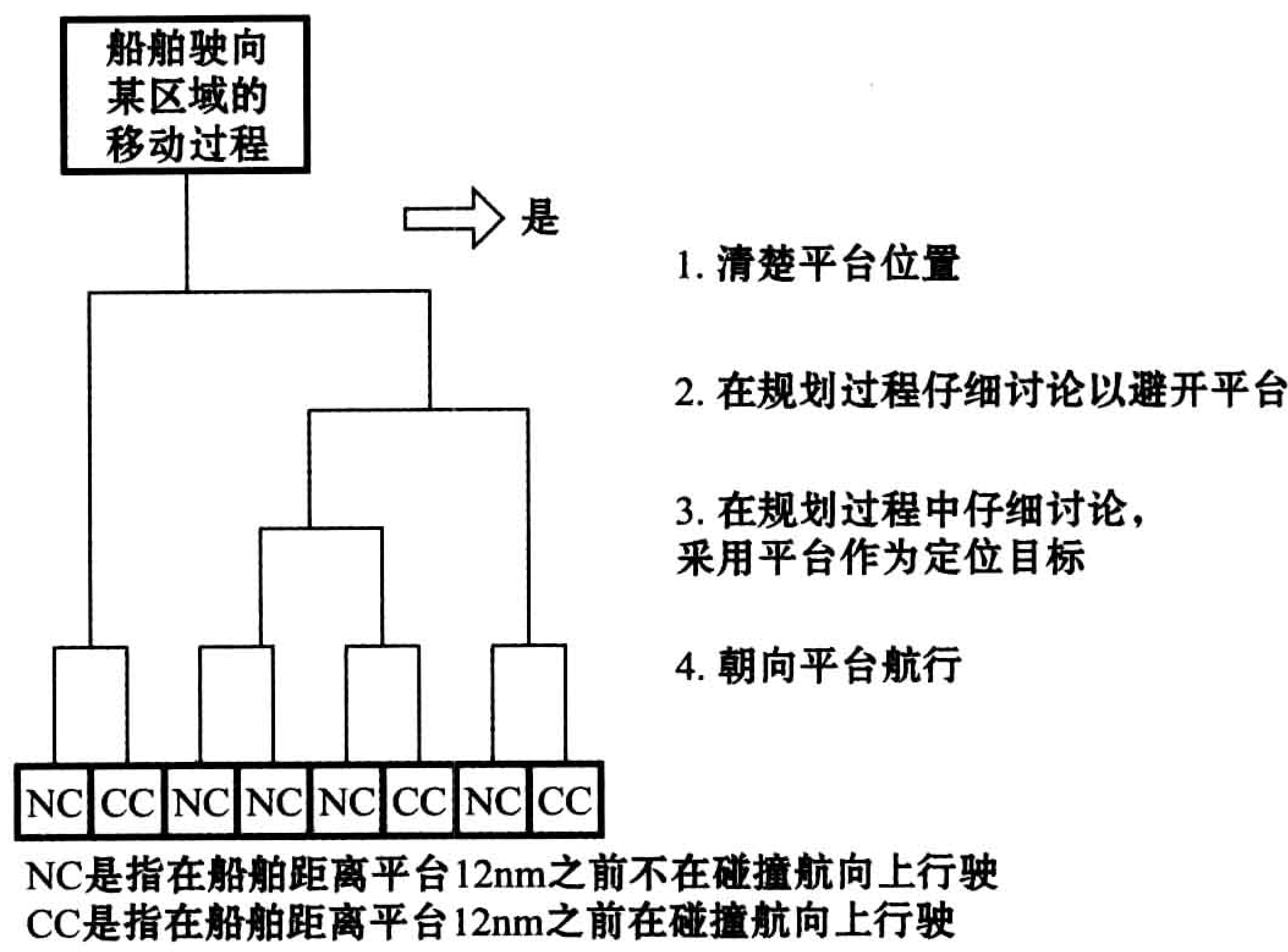


图 10.3　船舶距离平台 12nm 前碰撞航向概率的事件树

此事件树中有 8 个终端事件，分成两组即“正在碰撞航向上行驶的船舶”和“不在碰撞航向上行驶的船舶”。进一步的评估说明，“正在碰撞航向上行驶的船舶”事件无法综合进行考虑，因为后面考虑的人为因素与这艘船舶属于什么类别紧密相关。如“船舶初始矫正”的失败概率取决于是否考虑到“不清楚”、“计划”或“非计划”船舶。

图 10.3 中的事件树中没有包含所谓的“屏蔽效应”。这是一个海上设施如果“躲藏”在一个或多个海上设施后方（相对于从某个特定方向上的船舶交通）可能得到的“保护”。这不是一个概率值，而仅仅是一个集合因素，可视为确定值。

计算距离平台 12nm 时船舶正在碰撞航向上行驶概率的具体公式现在可以

从事件树中推导得出。对于 4 种主要的船舶类型,计算公式分述如下:

$$P_{CC1} = (1 - p_K)F_{D,1}F_{NS} \tag{10.3}$$

$$P_{CC2} = p_K(1 - p_{P,A})(1 - p_{P,PF})F_{D,2}F_{NS} \tag{10.4}$$

$$P_{CC3} = p_K(1 - p_{P,A})p_{P,PF}F_{D,3}F_{NS} \tag{10.5}$$

$$P_{CC4} = p_K p_{P,A}F_{D,4}F_{NS} \tag{10.6}$$

式中:

P_{CCl}——距离平台 12nm 时的碰撞航向概率:

l——1 表示不清楚船舶,l——2 表示非计划船舶,l——3 表示定位船舶,l——4 表示避免碰撞船舶

p_K——识别平台的概率;

$p_{P,A}$——避免碰撞计划的概率;

$p_{P,PF}$——定位计划的概率;

$F_{D,l}$——船舶驶向平台的比例;

F_{NS}——屏蔽因素。

10.3.4.2 识别平台的概率 Probability of Platform Being Known

识别平台的概率被视为平台在安装时就已确定的参数。信息发布对导航安全至关重要,这包括对海员发出无线导航警报和通知以及最终公布更新的航线图。从第一个通知发出到大部分船舶收到信息并更新他们的航线图之间需要花费一定的时间。因此平台增加信息需要一段过渡时间。换言之,可能永远都无法让所有的船舶都知道平台的存在,即使是一个固定平台,也同样如此,因为随时都可能有带着陈旧航线图的船舶(甚至没有任何航线图)驶过平台。(可参照上文有关不负责任导航员的讨论。)

另一个会有助于平台在安装之后被更多船舶知晓的因素是“穿梭船”。北海交通一个很大的组成部分是按照固定时间表行驶的船舶。这意味着它们会在固定时间经过同一个区域,它们很快就会知道某个区域任何新的海上设施,无论平台信息发布过程是否高效。

10.3.4.3 避免碰撞以及定位 Avoidance and Position-fixing

采取谨慎措施以避开平台的概率在航行规划阶段就已确定，它取决于船员是否有能力规划他们的航线，使得他们在通过目视或雷达观测到海上设施之前就能在远离海上设施的位置行驶。正如事件树背景中所述的那样，很明显这仅适用于那些清楚海上设施位置的船舶。

一些交通调查和船东的访谈已清楚地说明船东和导航员们经常在观测到平台之前就调整他们的航向，以确保船舶从离平台一段安全距离的区域经过。

新型的卫星导航系统试运行之后，导航精度非常高，尽管如此，一些导航员似乎仍然倾向于用目测海上固定设施（例如平台）的方式来确定船舶的方位。

实际上，这导致一些船舶故意将他们的航线安排得更靠近海上设施一些（同港口间依照直线航行相比）。这也是进行规划时应当考虑的一个方面，而且实际效果与通常的规划相反。这两种规划类型可称为“避免碰撞规划”和“定位规划”，它们不会同时出现。以下是一些相关假设：

- 想利用“避免碰撞规划”的船舶将从离平台很近的位置驶过，因此他们不需要进行“定位规划”；
- 想利用“定位规划”的船舶将在离平台一段安全距离的位置驶过，同样也不需要进行“避免碰撞规划”。

10.3.4.4 实例 Example

本节将举例说明一个假设的油气田海上设施，称为“××××”。为了便于举例，只挑出一条航线和一种船舶类型用于演示输入数据和得出的特定结果。实际航行航线数据参见表10.3、图10.5和10.10。可以看出，大部分的交通都是小型船舶，小于1 500dwt。

第二类大小类型的船舶（1 500～4 999dwt）被挑出用于举例，例中又将其分成3个子类别。同时也给出了速度类别、注册旗帜以及穿梭频率的分布。

为列举其他输入数据，以下内容可能会提及（请注意数据只对指定的船舶大小类型内有效）：

- 对于每年过往至多 1 次的船舶：
  - ○ 80%的船舶了解平台的位置；
  - ○ 10%的船舶定期更新航线图；
  - ○ 40%的船舶会进行避免碰撞计划，安全距离设定为 2nm；
  - ○ 15%的船舶将使用海上设施作为固定导航点。
- 每年有 140 艘船舶在所有季节进行双向航行；
- 高斯侧向分布的标准偏差为 6nm；
- 离××××海上设施的距离为 1.35nm。

表 10.3　斯塔特(Stadt)至泰恩/蒂斯(Tyne/Tees)航线的输入数据

商　船	<1 500	1 500～4 999	5 000～14 999	15 000～39 999	≥40 000
船舶数/年	113	25	0	1	1
轻型	0.333 333	0.333 333	0.333 333	0.333 333	0.333 333
中型	0.333 333	0.333 333	0.333 333	0.333 333	0.333 333
重型	0.333 333	0.333 333	0.333 333	0.333 333	0.333 333
慢速:5.8kn	0.100 000	0.100 000	0.100 000	0.100 000	0.100 000
常速:9.7kn	0.550 000	0.550 000	0.550 000	0.550 000	0.550 000
快速:13.6kn	0.350 000	0.350 000	0.350 000	0.350 000	0.350 000
旗帜类别 A	0.650 000	0.650 000	0.650 000	0.650 000	0.650 000
旗帜类别 B	0.100 000	0.100 000	0.100 000	0.100 000	0.100 000
旗帜类别 C	0.250 000	0.250 000	0.250 000	0.250 000	0.250 000
经过次数/年<1	0.650 000	0.650 000	0.650 000	0.650 000	0.650 000
1<经过次数/年<4	0.120 000	0.120 000	0.120 000	0.120 000	0.120 000
经过次数/年>4	0.230 000	0.230 000	0.230 000	0.230 000	0.230 000

输入数据有几个方面的条件概率，与不同大小类型的船舶相关：

- 按照大小类型分类(轻型、中型和重型)；
- 按照速度分类(慢速、常速和快速)；
- 注册旗帜(A 类、B 类和 C 类，见表 10.5)；
- 穿梭类别(<1 次/年、1～4 次/年以及>4 次/年)。

表 10.3 中每个大小类型内各方面的数值加起来必须等于 1.0。通常来说不同大小类型会有不同的数值，这与表 10.3 中的数据有所不同。

平台的宽度为 18m，几乎与航道朝向垂直（见图 10.5）。在标准的高斯分布中，下列数据可用于进一步的计算：

- 1.35nm　　～0.225 标准偏差；
- 1.35nm＋18m　　～0.226 62 标准偏差。

对于高斯分布，下式成立：

$$F(0.22662) - F(0.225) = 0.00063$$

这意味着船舶位于指定航道且具有既定标准偏差的情况下，撞上平台的条件概率为 0.063％。

10.3.5　船舶初始矫正失败的概率 Probability of Failure of Ship Initiated Recovery

到目前为止，在船舶能实际观测到平台之前的情况，无论是通过目视还是雷达，都已经讨论完毕。截至此时，船舶完全依赖于航线图和导航设备来确定它和平台的相对位置。

当平台已经位于船舶雷达的覆盖区域或者平台可以通过目视观测到之后，新的情况出现了。在这个阶段，任何一名船员，只要会使用雷达或能够探测到平台，他/她对这个区域的认知就已经脱离了之前的水平，这正是情况变化所在。

在这个区域内，之前将船舶划分为清楚/不清楚平台位置，或者对航线进行/不进行细致规划的分类已经失去意义，因为所有船舶现在都可以获得同样的信息和执行同样的措施。这并不意味着不同的船舶类型即使进入了这个区域也必然会采取同样的措施，但是所有船舶面临的机会均等。这个区域的外部界限将取决于船舶雷达的探测范围和船员的目视能力。

这个范围可能相差巨大，这与船舶大小和安装的设备有关。对于中小型船舶而言，可能不适合装备载超过 10～12nm 范围的雷达，因为雷达天线无法安装到足够高的地方来覆盖这个范围之外的区域。而大型船舶很可能有更高的上层建筑，天线位于比海平面更高的位置，可以使用到更大的雷达覆盖面积，但是人们认为对于这些船舶而言，12nm 的雷达覆盖面积已经足够。对于大型船舶，

这个假设可能显得有些保守。

在一个调查问卷中(Haugen，1991)，船长们被问及如果他们发现船舶正驶向一个平台，会选择什么时候改变航向。答案包括从“立即”到“离平台 3～5nm”。根据 Haugen(1991)，这说明“常规”矫正时间一般在平台被发现的时刻到距离平台 3～5nm 的期间内。

于是，船舶初始矫正可以分成两个“阶段”，其中初始常规矫正被称作“早期矫正”。这个时段内的矫正与常规实践相一致，并不表示进入了特殊状态。然而，如果这段时间内没有进行矫正，这意味着船舶值班无效或者无船员值班。然而，依然还有将近 20min 的时间(假设距离为 4nm，平均速度为 12kn)从这个状态中矫正，这个阶段状态进行矫正的概率也必须考虑在内，称之为“末期矫正”。船舶初始矫正的 3 个失败模式可以一并归类，可能的原因如下：

- 舰桥上值班人员未作出反应(值班失误)：
  - 不在舰桥上；
  - 在舰桥上但是忙于其他事务；
  - 在舰桥上但是无法胜任；
  - 在舰桥上但是睡着；
  - 在舰桥上但是因为醉酒而无法胜任；
  - 使用的雷达无效(低能见度)。
- 舰桥上的值班人员采取错误行动。
- 设备故障。

第二项很可能不重要，因为所需采取的举措非常明显。除了雷达故障之外，其他设备失效导致碰撞的概率也较低，可以忽略不计。

以上列出的 6 种值班失误主要都是人为失误。但也有可能是导航员故意继续在碰撞航向上行驶。除去恐怖分子和自杀因素，这有可能是因为其他的障碍物、平台或者船舶导致导航员选择继续驶近平台，之后再改变航向。很多通用失误模型经常用于计算各种失误模式的概率。因此在这方面需要更多更详尽的模型。

事故统计清晰地说明，当能见度降低时，船舶碰撞、搁浅或触礁的概率会大大增加，船舶与平台碰撞也存在这种趋势。因此能见度条件是最重要的因素，需要重点关注。能见度条件可以用分别为较好和较差能见度事件树来说明。

如果船舶只装配一个且可能不稳定的雷达，在能见度较差的情况下，碰撞概率会明显增加，除非这艘船采取了其他预防措施，如降低航速，这样就能够提供更多时间来发现平台和采取避免碰撞措施。另一方面，精密的现代设备如果使用不当，也没有任何意义。

安装在平台上的雷达信标(RACON)也能够影响雷达的效率。装有雷达信标的平台将会返回一个雷达信号。与未装有雷达信标的平台相比，该信号更容易被探测和识别。

船上配备人员的数量也非常重要。在舰桥只配有一名船员的船舶和配有两名船员的船舶相比，会产生显著差异。效果体现在众多方面，但最重要的影响在于入睡概率。总体而言，人员配备水平很大程度上取决于船舶大小和类型，这也可以用作评估风险水平的一个因素。但是舰桥上的船员数量并与船舶大小和类型并不是非常相关。人员配备水平还跟所谓的"旗帜效应"有关(见表 10.4)。

表 10.4　旗帜效果的类别

类别	归属于某类别的国家
A	丹麦、法国、德国、荷兰、意大利、日本、挪威、西班牙、瑞典、英国、美国
B	塞浦路斯、希腊、利比里亚、巴拿马
C	其他旗帜

另外一个应考虑的因素是在某个区域会发生的常见活动。与平台位于偏僻位置且船舶行驶时没有其他限制的情况相比，如果平台位于存在其他平台或有其他众多航行限制的区域，值班人员很可能会具备更高的观察意识，也更加警惕。典型的船舶初始矫正值如表 10.5 所示。

表 10.5　矫正失败的典型概率

矫正失败模型	矫正失败的概率	
	船舶引起	平台引起
醉酒	$1.1 \cdot 10^{-4}$	0.72
入睡	$2.3 \cdot 10^{-3}$	0.2
事故	$1.2 \cdot 10^{-5}$	0.75
无人值守	$9.5 \cdot 10^{-4}$	0.012
分心	$9.5 \cdot 10^{-4}$	0.01
雷达	$9.8 \cdot 10^{-3}$	0.18

10.3.6 平台初始矫正失败的概率 Probability of Failure of Platform Initiated Recovery

避免碰撞发生的最后阶段称之为平台初始矫正。平台初始矫正失败的概率处理起来要比船舶初始矫正简单一些。只有迫近船舶进入 20min 界限内时，才会被视为平台的威胁。在这种情况下，我们也可以假设规划、非规划和不清楚船舶具有不同的界限。实施平台初始矫正的能力主要取决于以下所述措施是否及时实施：

- 将船舶识别为潜在的威胁；
- 尝试在甚高频波段（VHF）上呼叫船舶；
- 将守备船停靠在船舶旁边；
- 守备船采用正确的避免措施。

正如前文所述，平台初始矫正和船舶初始矫非常相关。平台初始矫正的概率很大程度上取决于船舶初始矫正失败的原因（Haugen，1991）。

船舶和平台初始矫正的典型值参见表 10.5。应当注意，平台初始矫正的失败概率是一个条件概率，也就是在船舶初始矫正已经失败的情况下。

在挪威区域，船舶交通监督中心监控着大部分海上设施潜在碰撞航向上的船舶。目前存在两个此类中心，一个是离岸中心，覆盖北海挪威海域南部，另一个是位于挪威石油伯根业务办公室的岸上中心，覆盖北海挪威海域北部以及挪威海。后者监控最多数量的海上设施，报告可信度也最高。海上设施发出的雷达信号通过光缆传输到监控中心，监控中心对其进行整合，来显示一大片范围内的情况。这意味着交通中心的雷达操作员可以跟踪到遥远距离的船舶，尤其是北海上的船舶。依靠自动识别系统（AIS），中心还可以获知船舶的名字和其他详细信息。

10.3.7 实例结果 Example Results

表 10.6 所示为××××海上设施和航线 6 的结果，包含体型类别为 1500～4999dwt 中不同的子类别以及不同速率类别的结果。

表 10.6 COLLIDE® 中航线 6 的结果

碰撞类型	交通类别	船舶	载重/DWT	速度/kn	碰撞能量/MJ	碰撞频率/次年$^{-1}$	累计频率/次年$^{-1}$
朝向碰撞航向	1 号航线	商船	3 800～4 999	13.61	128.01	6.5E-006	6.5E-006
朝向碰撞航向	1 号航线	商船	2 600～3 799	13.61	94.32	6.2E-006	1.3E-005
朝向碰撞航向	1 号航线	商船	3 800～4 999	9.72	65.31	1.0E-005	2.3E-005
朝向碰撞航向	1 号航线	商船	1 500～2 599	3.61	57.94	6.0E-006	2.9E-005
朝向碰撞航向	1 号航线	商船	2 600～3 799	9.72	48.13	9.7E-006	3.9E-005
朝向碰撞航向	1 号航线	商船	1 500～2 599	9.72	29.56	9.4E-006	4.9E-005
朝向碰撞航向	1 号航线	商船	3 800～4 999	5.83	23.51	1.9E-006	5.0E-005
朝向碰撞航向	1 号航线	商船	2 600～3 799	5.83	17.33	1.8E-006	5.2E-005
朝向碰撞航向	1 号航线	商船	1 500～2 599	8.83	10.64	1.7E-006	5.3E-005

	能量类别/MJ					
交通类别	类别 1	类别 2	类别 3	类别 4	类别 5	
	0～15	15～50	50～100	100～200	⩾200	总计
1 号航线	1.7E-005	2.3E-005	2.2E-005	6.5E-005	0.0E-005	5.3E-005

10.3.8 COAST® 数据库 COAST®

COAST® 数据库(Satetec, 2002)是一个航线数据库,最初仅从关注北海开始,于 1996 年 3 月首次发行。那时起,数据库一直持续进行更新,以确保任何交通模式和密度都可以探测到。海上设施数量的增加和港口活动的变化都可能对区域内的交通造成极大影响。COAST® 数据库使用 MapInfo® 作为地理信息系统(GIS)平台,并对演示海上航线和船舶信息的 ARCS® 航线图进行数字化。该数据库有几个不同数据源,包括:

- 劳埃德港口日志;
- 港口统计数据;
- 轮渡交通的统计数据;
- 海岸雷达的数据;
- 船舶和海上设施的工作人员的信息;

- 领航员的信息；
- 离岸雷达的数据；
- 岸上及离岸自动识别系统(AIS)的数据；
- 离岸交通监测。

最初发行的COAST®数据库主要关注北海英国海域。为了将数据库扩大到挪威海域，挪威石油行业协会(OLF)和舍夫泰克(Safetec)咨询公司在2001年启动了一个项目，绘制了挪威海域的日常船舶交通图(COAST®挪威数据库v2002)。这个项目收集了海上固定设施的雷达数据、操作员统计的离岸交通数据、大型油船的航线计划以及广泛的港口统计数据。这个数据库现在拥有许多日常船舶交通数据，包括：

- 每条航线的交通容量；
- 航线的标准偏差(确定每条航线的宽度)；
- 每条航线的船舶类型分布(通用货轮、散货船、油船、集装箱船、滚装船、补给船、守备船以及渡轮等)；
- 每条航线的船舶体型、旗帜以及服役年限。

虽然COAST®数据库拥有日常船舶交通的众多信息，但却没有覆盖那些不定期交通的数据，例如捕鱼船、军舰、游艇以及和海上移动设施相关交通。

为了增加COAST®数据库的精确度，舍夫泰克(Safetec)咨询公司最近经授权可以获取北海和挪威海岸线的自动识别系统(AIS)历史数据。相对于标准雷达系统，自动识别系统(AIS)系统可以覆盖的面积明显要大得多，因为自动识别系统(AIS)使用甚高频波段(VHF)无线电信号，而非雷达。自动识别系统(AIS)数据还提供可追踪驶过更大海域船只的信息，此外还可以提供每条航线上更详细的船舶信息。所有这些提供了更好的机会以增加数据库的准确性，从而建立了一个在北海和挪威海域更加准确的交通模式图，而且也易于更新。COAST®自诞生起就一直持续更新，目前已确定将要在该数据库的未来版本定期收集的自动识别系统(AIS)数据。

COAST®数据库是独一无二的，范围覆盖全球，目前包括如下海域：

- 英国海域；

- 爱尔兰海；
- 挪威海域；
- 荷兰；
- 法罗群岛；
- 墨西哥湾；
- 地中海；
- 霍尔木兹海峡；
- 新加坡海峡；
- 帕里亚湾(委内瑞拉)。

10.3.9 模型验证 Model Validation

接下来的讨论很大程度上是基于 COLLIDE® 方法,这是在业界最广为接受的方法。COLLIDE® 和 COAST® 的主要不足之处在于：

- 当航线靠近海上设施附近时,航线终点的定义(尤其是所谓的宏观位置)非常苛刻。这些点的位置是不确定的。为了降低这方面的重要程度,宏观位置的使用明显受限。
- 船舶初始矫正失败模型基于非常通用的数据和众多假设。因此带来了非常大的不确定性。
- 导航过程的建模出现在卫星导航系统普及之前。这些系统广泛使用后,其对碰撞风险的影响并没有进行过考虑。这同样也适用于自动识别系统(AIS)。
- 这个模型已经在全球层面对整个北海进行了充分验证。尽管上面提到了其弱点,但模型所得结果平均而言依然比较正确。然而,对于某个特定区域或特定航线,模型还没有得到充分验证。

因为现有模型有如下适用范围和有效性的限制,所以这些建模因素还需要改进：

- 结果对北海的一般离岸设备区域有效。
- 在特定区域的有效性则无法完全肯定。
- 对于特定航线和交通，结果的有效性则更加无法肯定。这意味着风险降低措施的效果完全无法确定，也无法利用现有模型来进行确定。

COLLIDE®模型虽然还有很大的改进空间，但它仍然是目前已有的最先进模型。在本书行文之初，COLLIDE®软件已发布了一项更新，就是为了处理上文所提到的一些问题。

10.4 碰撞能量 Collision Energy

10.4.1 冲击能量和平台能量的吸收能力 Impact Energy and Platform Energy Absorption Capacity

挪威海上建筑物设计规范(DNV，1981b)中抗撞击的要求为：正面碰撞不低于 11MJ，侧面碰撞不低于 14MJ(假设船舶质量 5000t，速度 2m/s，动力附加质量分别为 10%和 40%)。计算动能如下式：

$$E=\frac{1}{2}(m+a_m)\cdot v^2 \qquad (10.7)$$

式中：

m——船舶质量；

a_m——水动力附加质量；

v——冲击速率。

由此看来，与排水量 1 000t、水动力附加质量为 10%、速度为 10kn 的船舶

发生正面碰撞所产生的冲击能量刚好低于此技术规范的标准。换而言之，小型商船动力碰撞的能量可能低于设计下限。另外，设计规范中规定的抗冲击冗余能力和储备强度的计算结果显示，平台在发生整体坍塌前可以承受的冲击能量可能大大高于设计规范的要求。半潜式平台的能量吸收能力可接近 60MJ，而大型混凝土平台抗冲击能力更是高出许多。另一方面，对于较小且较易受损的平台，例如带小型导管架平台，抗冲击能力可能接近于设计规范标准。

基于上述讨论，有人认为，最小型船舶即使在全速航行时也不会对平台造成真正的危险。这个结论至少对于挪威大陆架上的大型综合性平台而言是正确的。但是从另一方面来看，抗撞击能力较差的小型平台在未来将更为普遍。此外，不同国家的抗撞击设计标准也有所差异。

10.4.2　碰撞船舶的质量
Mass of Colliding Vessels

根据载重吨位(dwt)，通常将船舶分成不同的大小类型。船舶的质量用排水量表示。估算排水量的问题在于排水量并非定值，而是随着船舶处于载重或是空载状态而变化。除了船舶的自重外，还必须考虑水动力附加质量。

10.4.3　碰撞船舶的冲击速率
Impact Velocity of Colliding Vessel

10.4.3.1　动力撞击
Powered Impacts

船舶的速率类别应当根据不同船舶特有的工作速度进行判断。除了预测平均速度，还应考虑每种船舶大小类型内的特定分布。

10.4.3.2　失控船舶的漂移速度
Drifting Speed of Disabled Vessels

当一艘船舶处于失控状态并滞留在海上时，它会受风力、海浪和水流的影响发生漂移。在过渡阶段，这些外力会对船舶发生作用，使其航向和轨迹发生变化。随后进入到稳定漂移阶段时，船舶会有固定的航线、速度和恒定的航向

(除非风向和水流方向在不断变化)。

船舶在进入稳定阶段前漂移的距离相对较短,因此在此对过渡阶段的漂移速度不做讨论。在这个阶段发生碰撞的可能性也很小。漂移速度很可能介于2～3kn(低于2m/s),如表10.7所示。

表10.7 漂移速度的平均值(kn)

船舶分类 \ 风速	3	4	5	6	7	8	9
商船							
0～1 499DWT	0.9	1.1	1.4	1.7	2.1	2.6	5.0*
1 500～4 999DWT	0.9	1.1	1.4	1.7	2.1	2.6	5.0*
5 000～14 999DWT	1.1	1.3	1.7	2.1	2.5	2.3	5.0*
15 000～49 999DWT	0.9	1.2	1.4	1.7	2.1	2.3	5.0*
40 000DWT以上	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.1	2.2
捕鱼船	0.9	1.1	1.4	1.7	2.1	2.6	5.0*
守备船和供给船	1.1	1.3	1.6	1.9	2.3	3.1	5.0*
穿戴油船	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.1	2.2

* 表示保守估计

10.4.4 临界碰撞 Critical Collisions

影响碰撞后果的因素有很多,这取决于海上建筑物的设计特点、实际具体行驶路径以及几何因素。其中最重要的因素包括:

- 平台结构的设计或计算原理;
- 防撞或加固设计;
- 平台表面结构;
- 碰撞船舶的质量和速率;
- 船舶和平台的碰撞能量分布;
- 碰撞船舶的强度;
- 平台和船舶的相对位置;
- 碰撞点位置。

这些因素中，有一些明显与概念无关(例如碰撞船舶的速率和质量)，而其他一些因素(如平台的设计和计算)则显然与概念相关。

以上所列的因素中，最重要的很可能是碰撞船舶的质量和速率，也就是动能。使用能量守恒原理做一个简单方便的假设：碰撞前船舶移动中所产生的动能转化为撞击后的动能(原则上船舶和海上设施都会具备)和形变(弹性和塑性形变)能量。由于不同船舶的设计差异很大，这个原理应谨慎使用。有一些船舶会比其他船舶吸收更多的动能。应当注意，只有在发生正面相撞导致船舶停滞时，所有动能才会被吸收。侧面碰撞时，部分冲击能量会以动能的形式被保留下来，这就意味着临界碰撞时必定会有更高的初始冲击能量。

碰撞中除了冲击力和惯性力，其他作用力忽略不计。假设发生对心碰撞，以应变能形式消耗的能量为：

$$E = \frac{1}{2}(m + a_m)v^2 \frac{\left(1 - \frac{v_i}{v_v}\right)}{1 + \frac{m + a_m}{M + A_m}} \tag{10.8}$$

式中：

m——船舶排水量；

a_m——船舶附加质量；

M——海上设施排水量；

A_m——海上设施附加质量；

v_v——船舶[冲击]速率；

v_i——海上设施[冲击后]速率。

10.5　碰撞后果 Collision Consequences

对于给定的冲击能量，平台撞击后果主要取决于平台概念和碰撞场景。在前面第 10.4.4 节中已经列出了一些最重要的因素。

不同破损级别的临界碰撞速率取决于船舶的大小。整体结构失效的典型临界速率如表 10.8 所示。

表 10.8　整体失效的临界撞击速率

	碰撞船舶	船舶排水量/dwt	临界速率/ms^{-1}	临界速率/kn
正面碰撞	捕鱼船	700	8.8	17.1
	供给船	2 500	4.7	9.1
	商船	10 000	2.3	4.5
	半潜船	50 000	1.0	1.9
	母船	2 200	5.0	9.7
侧面碰撞	母船	2 200	4.4	1.9
船尾碰撞	母船	2 200	5.0	9.7

10.5.1　失效准则 Failure Criteria

失效准则必须反映出研究的目的。如果只考虑结构而不是整个平台概念，那么就应当选择不同的标准。对于结构，最常用的失效准则是：

1）整体失效：撞击导致结构严重变形，要求撤离人员和停止运行。

2）局部失效：局部应力超过屈服强度，发生了塑性且不可恢复的变形。平台的完整性没有受到威胁。

如果考虑到平台整体受撞击后的情况，那么可能会有附加的失效准则，例如对立管或井上传导装置冲击有关的要求。这些准则和整体失效的准则有所不同，特别是对于钢导管架结构而言。下面的各章节中将对这些情景进行分析。

10.5.2　碰撞几何 Collision Geometry

碰撞的几何问题可以决定船舶和平台的能量分布，能反映出是否撞击到硬点以及船舶所保留的剩余动能等情况。对于钢导管架结构，应当注意以下特点：

● 撞上垂直塔柱或支撑架	撞上支撑架会导致较大的塑性变形，因而结构会吸收更多的能量。
● 对心碰撞或“侧面擦碰”	船舶可能会保留大量的动能，如果发生“侧面擦碰”，可能是最后时刻的躲避行动所致。
● 船舶旋转	撞击能量可能转化为旋转能量，因而平台结构需要吸收的能量有限。
● 船舶接触点	对于受到撞击的混凝土塔柱而言，船舶接触点可能尤为重要。如果接触点是船舶的“硬点”（如像球形船首、船尾或者边缘等有大量框架曲线的部位），就会产生很大的穿刺载荷。

10.5.3 局部碰撞破损 Local Collision Damage

挪威石油标准化组织(NORSOK)钢结构设计标准(NORSOK, 2004b)附录 A 中对钢制结构受损情况进行了大量评估，针对以下意外载荷进行了相应的设计：

- 船舶碰撞；
- 坠落物体；
- 火灾；
- 爆炸。

以下是挪威石油标准化组织钢结构设计标准(NORSOK)附录 A 中所涉及的与船舶碰撞结果相关的因素：

- 碰撞机理；
- 应变能的损耗；
- 碰撞力；
- 变形力与管状构件凹陷的关系；
- 变形力与横梁的关系；
- 连接件强度；

- 相邻结构强度；
- 延性限度；
- 加固大直径塔柱的抗撞击能力；
- 浮式生产船舶的能量损耗；
- 撞击时设备完整性。

10.5.4 整体破损 Global Damage

对于有 4 根腿柱的钢导管架平台而言，如果其中一根腿柱失去承载能力，那么通常就被视为发生整体失效。通常需要根据具体情况进行结构分析。通常外部载荷会决定腿柱的设计规格，因此腿柱本身具有备用能力。整体失效通常在能量高于 20MJ 时出现。

导致一座有 6 根或 8 根腿柱的钢导管架平台整体失效的碰撞能量预计比 4 根腿柱的平台要更高。在这种情况下，人们经常认为必须有 2 根腿柱失效才会导致整体失效。

举个简单的例子，有观点认为第二根腿柱的抗撞能力只有原始抗撞能力的 50%。通常整座平台的抗撞能力为 30MJ 的量级。一般选用 30MJ 作为 6 根或 8 根腿柱的导管架平台的整体失效标准，这就了说明 50%的假设可能只是保守估计，除了这 2 根腿柱外，船舶还会使其他平台支撑物发生变形。

10.6 降低风险的措施 Risk Reducing Measures

10.6.1 降低风险措施概述 Overview of Risk Reducing Measures

讨论降低风险的措施时，必须要考虑到对海上设施产生最大风险的船舶类

型。可以通过对不同类型的船舶建立碰撞风险量化模型来验证各种降低风险措施的效果。对于过往船舶、附近航行船舶、漂移船舶和漂移浮式单元采用不同的模型。以下讨论仅限于过往船舶的碰撞。

正如前面章节中所提到的，尽早得到潜在危险的预警至关重要。这一点适用于所有类型的船舶。因此平台上的碰撞预警系统显得尤为重要。只要在平台上较高的位置装有天线，带有自动标绘仪（ARPA）的雷达就可以监控距离平台 30～40nm 范围内的船舶。船舶自动识别系统在甚高频带上传输信号，探测范围一般约为 40nm，在较佳的条件下可能达到 60～80nm，因此在平台上安装船舶自动识别系统可以扩大雷达的探测范围。

对于危险航向上的船舶不应该在距离为 40nm 处就发出警告，因为在这个距离内的很多船舶都处于理论上会发生碰撞的航向上，但随后却计划改变航向远离平台。

舍夫泰克（Safetec）咨询公司曾为健康与安全管理局（HSE）海上安全部门做过一项研究（HSE，1997b），评估不同情境中使用各种碰撞控制和避碰系统的益处。研究中对 6 种不同系统在降低碰撞概率方面的益处进行了评估。所调查的系统包括了：

- 配有标准航海雷达的守备船；
- 配有自动雷达标绘仪（ARPA）的守备船；
- 海上设施安装的雷达早期预警系统；
- 船舶交管系统（VTS）。

这些系统在不同的环境条件下进行评估，并针对不同交通模式的特点，例如分为高密度交通-高速船舶以及低密度交通-低速船舶等。由此确定了在不同场景中通过采用各种系统来躲避碰撞的概率。这些概率可以用来计算其他海上设施的整体风险减缩因数。风险降低的程度因位置特性而有所不同。

10.6.2　过往船舶 Passing Vessels

以下是过往船舶碰撞模型中与风险降低概率有关的不同参数：

● 交通容量	无法进行改变。
● 平台被识别的概率	更有效地发布平台信息可以提高这一参数。可以实行专项措施。
● 避碰规划的概率	几乎不会出现明显变化。
● 定位规划的概率	几乎不会出现明显变化。
● 航道中心线和平台间的距离	改变航道或者平台的位置可以使距离发生变化。移动航道位置需要修改国际协议(交通规则),因此除非风险很大,否则并不可行。改变平台的位置通常也不可能实现,除非是很罕见的中间助推器平台和管线。
● 航道交通的横向分布	几乎不会出现明显变化。
● 船舶初始矫正失败的概率	几乎不会出现明显变化。
● 平台初始矫正失败的概率	通过以下方法可以对其产生影响: ○ 在甚高频无线电广播上呼叫船舶; ○ 声光信号; ○ 有效使用直升机; ○ 守备船的有效干涉。

回顾碰撞风险模型,即式(10.2),可以确定降低碰撞风险等级的概率。3个会受到实质性影响的参数为:

- 平台被识别的概率;
- 航道和平台间的距离;
- 平台补救失败的概率。

如果平台位置可以改变,那这很可能就是最简单的方法,但是通常这种方法不可行。因而,只能采取下列措施:

- 改善平台信息发布的效率。
- 启动向迫近船舶发出警告的程序:
  - ○ 碰撞预警系统;

  - ○ 在甚高频率上呼叫船舶；
  - ○ 使用平台上的声光信号。
- 有效使用守备船。
- 有效使用直升机。
- 使用拖船。

10.6.3 降低风险措施的效果 Effect of Risk Reducing Measures

在以下章节中将简要讨论各种与过往船舶相关的风险降低措施，首先将从设备、行动或程序的角度简要介绍采取每种措施的意义。同时还简要提到了受影响的船舶类型以及与碰撞模型有关的参数。另外，对各项措施也会进行定性讨论。

10.6.3.1 碰撞预警系统 Collision Warning System

相对其他区域而言，碰撞预警系统已经在北海和相邻海域广泛应用。这是一种雷达系统，当船舶处于向平台迫近的航向上（如在特定时期内船舶向平台行驶并保持航向不变）时，它会自动发出警告。该系统具有以下特点：

- 受影响的船舶类型　从某种程度而言，可以包括所有船舶。对于过往船舶作用最为重大，而对于来访船舶则作用有限。
- 受影响的模型参数　对于碰撞风险无直接影响，但是可以促使其他措施尽快实施。
- 效果讨论　使用专用的碰撞预警系统可帮助平台上的船员更早、更可靠地探测碰撞航向上的迫近船舶，以免发生撞击。该系统可以跟踪进入雷达探测范围的所有船舶，并在这些船舶处于可能使其过于接近平台的航向上时，发出警告。预警范围可以进行设置，例如设置为安全区域半径。

  所增加的预警时间可用于在甚高频或无线电广播上与船舶联络、进行直升机起飞的准备工作（如果条件

允许)以及放置守备船等。向船舶发出警告的概率将大大增加。更多的时间也意味着即使值班员无所作为,其他船员也可以有充足的时间进行矫正
从过往船舶的碰撞模型来看,所产生的效果是平台初始矫正的时间由 20min 增加到 30～40min。

对于挪威水域内 30 个海上设施附近船舶交通的监控始于 1998 年,岸上监控中心依靠从海上设施上传送的雷达屏幕图像进行监控。这座交通监控中心长期配备工作人员,对所有相关海上设施进行自动和人工追踪。人们认为,此类监控的可靠性很高。

最新的技术可将船舶自动识别系统数据和雷达数据进行整合,以广泛获取处于可能碰撞航向上船舶的识别和描述信息。

10.6.3.2 平台信息发布 Distribution of Information about Platform

改进平台位置和安装日期的信息发布工作,对于使平台识别度达到最高起着重要作用。改进的方法有很多。这项措施适用于长久处于某一位置的海上生产设施和装有船舶识别系统的海上移动设施。其特点如下:

- 受影响的船舶类型　　过往船舶。
- 受影响的模型参数　　平台被识别的概率。
- 效果讨论　　在平台安装后的前几个月,平台被识别的概率一般都会大幅增加。在某些地方,通过改善信息发布的效果甚微。这些措施通常只在平台安装后的初始阶段对降低风险水平较为有效。

10.6.3.3 对船舶发出警告 Warning the Vessel

这项措施包括了从平台或者从守备船向处于错误航向上的船舶发出警告。可以采取多种方法向靠近的危险船舶发出警告。首选在甚高频无线电广播上进行呼叫。其次是用警告号角和光信号等方式。守备船也可以对船舶使用消

防水炮发出响声来警告船舶上的船员。

- 受影响的船舶类型　　过往船舶和附近航行船舶。
- 受影响的模型参数　　平台初始矫正失败的概率。
- 效果讨论　　对迫近船舶进行早期预警之后，就可以有更多的时间采取各种措施对靠近船舶发出危险警告。

在各种措施都已无效的情况下，为了减轻即将发生碰撞的后果，最终应当选择中止平台的运行并撤离。

以下是碰撞预警和避碰程序的概述：

1）自动碰撞预警系统会根据预设限值（通常为 45min）发出碰撞航向上发现船舶的警告。这就表示船舶在进入雷达探测区域后就已经被追踪了一段时间（尤其是由岸上监控站进行监控时）。雷达预警系统可以提供迫近船舶的位置、航向、最近会遇点、速度和预计到达时间等信息。

2）当警告发出后，守备船会立刻获知迫近船舶的航向和位置。

3）平台和/或守备船的首要行动就是在甚高频无线电广播上开始呼叫。同时，守备船开始向平台和船舶间的位置驶去。

4）如果在呼叫后的几分钟内船舶没有做出回应，守备船就开始驶向迫近船舶。在此之前，必须确保守备船的最大行驶速度至少与迫近船舶的速度相同。同时，继续在甚高频无线电广播上进行呼叫。

5）守备船应在距离平台 20～30min 航程的地方与迫近船舶相遇。随后守备船在迫近船舶旁边占据适当的位置，在确保安全的情况下尽量接近。

6）守备船就位后，立即开始使用各种现有的海上声光信号，包括泛光灯、白色照明弹以及雾角等。

7）如果在 5～10min 后船舶仍然没有做出回应，就需要实施进一步的措施，目的在于使船体发出响声。这包括使用消防水炮使船体发出响声，极端方式还包括向船体投掷小型爆炸物或重物，以引起值班员和其他船员的注意。

8）在 10～15 年以前，人们普遍认为在距离平台 15～20min 航程时，如果迫近船舶仍没有响应，守备船应做好尝试使迫近船舶转向的准备。在这个距离的时候，即使是 5°的偏转也足以避免碰撞的发生。但是之前几年实际接触中的失败经验已经改变人们的观点。如今，守备船的船长已经不太可能做出与迫近船

舶进行船体接触的决定。

是否进行接触取决于守备船船长对于这一行为合理性的评估。这一行为可能会对守备船和迫近船舶造成结构性破损，这取决于两艘船的大小。船长进行评估时必须同时考虑到两艘船舶和船上人员的安全。

如果按此程序执行，其中很多步骤都足以使迫近船舶察觉到它正处在碰撞航向上。因此，对于各种措施的效果需要按照实施的顺序分开讨论。

在碰撞模型中，对可能的碰撞所进行的矫正行动分为两类：船舶初始矫正和平台初始矫正。在模型中，假设没有预警系统，并且只有在船舶距平台最后20min 航程时，平台才会进行补救。在这之前，通常认为由船舶自身进行补救。

使用预警系统就意味着平台初始矫正可以提早进行。在对各项内容进行建模时，当船舶初始矫正被认为开始对碰撞概率产生影响的同时，平台初始矫正也会开始发生作用。

10.6.4 避免碰撞的经验 Experience with Collision Avoidance

通过参阅油气田的有关资料来获取与避免危险碰撞经验相关的数据相当困难。因此下面所采用的数据并不完整，只包含了与相关公司接触中可能得到的信息。这些信息均来源于非公开资料。这里讨论的经验没有重点关注捕鱼船。为了捕鱼，捕鱼船会经常行驶到海上设施附近，事实上经常就在 500m 安全区域外。

有一项重要的观测数据表明，在无线电广播上被呼叫的船舶似乎越来越不愿意对它们的身份和具体航程信息做出回应。

1986 年 6 月 24 日，在挪威海(哈尔滕班肯地区)，一艘约 2 900GRT 的德国商船和平台几乎发生了碰撞。当时平台正在进行钻井工作，而船舶一直在正对着移动钻井单元的航向上行驶。钻井单元和守备船一直试图在无线电广播上呼叫这艘船舶，但是没有成功。直到距离海上设施 200m 时，船舶才偏离危险航向，但已闯入安全区域。除此之外，没有其他避免碰撞行动的相关案例。

1982 年，在北海发生了一起事件，当时守备船为了使捕鱼船改变航向远离海上设施，在安全区域外与其发生了船体接触。作为责任方，石油公司最终不得不为捕鱼船的损坏进行赔偿。

对潜在碰撞威胁的监控工作开展得相对较晚，开始于 20 世纪 90 年代后半期。据观察，如果通过岸上监控的方法提升了探测可靠性，探测到碰撞航向上船舶的比例也随之提高。单单在挪威海域，每年会发生约十几次守备船驶向迫近船舶以使其改变航向的事件。

在其中的一次事件中，守备船在迫近的大型拖网捕鱼船的航向上迅速占据了合适的位置，但是拖网捕鱼船还是没有对无线电联络做出回应并继续向守备船行驶。直到守备船开启了泛光灯后，捕鱼船才改变了航向。

1995 年在德国海域内发生了一起碰撞事故（见第 10.1.2.2 节），一艘小型德国货船与管线立管平台（诺派普 H-7 号平台）发生了接触。但实际上，事故中海上设施没有受到损坏，而船舶也只是轻微损坏。以下就是事件的简要概括以及各相关步骤的时间：

- 约 10:00 时　守备船探测到了靠近的船舶，守备船船长认为，根据肉眼观察，最近会遇点为海上设施西面 800～900m 处。
- 约 10:35 时　守备船船员称船舶改变了航向，直接向海上设施驶来，但未获平台上船员的确认。
- 约 10:37 时　守备船开始鸣笛并驶向迫近船舶（此时距离为 800m）。
- 约 10:42 时　在碰撞发生前几秒，平台上发出紧急警告并且终止了运行，随后船舶便擦过了平台的一根腿柱。发生接触时，守备船距离商船 50m。

此次事件中的避碰行动并不算成功。而在此次事件后，平台操作员改变了预警和避开危险船舶的程序。

10.6.5 实例 Example

上文中已经说明，对风险降低措施的效果一般很难进行量化分析，因为还需要考虑到平台、事故地点和交通情况之间的各种差异。

基于某些原因，过往船舶可能是最大的问题所在。在一些高风险地区，过往船舶是造成事故的最主要原因。另外，如果还有其他更重要的原因，那通常就是以某些方式与平台运行相关的各种船舶，例如供给船和海上油船。相比于

商船,这些船舶经常采用限制操作或者改良设计等措施,可以更方便地对风险加以控制。而这些措施对于商船则无法适用。

因此,启用碰撞预警系统以及向碰撞航向上迫近船舶发出警告的程序最重要的风险降低措施,至少可以降低发生商船碰撞的风险。

为了说明效果,人们对北海上的一个现有平台进行了 COLLIDE® 建模计算。这是一个立管平台,因而其供给船访问数量有限。附近也没有其他油气田的近海船舶频繁活动。周围有很多捕鱼作业,但是捕鱼船一般很小,几乎不会产生对平台构成危险的碰撞能量。所以,我们可以认为过往商船是主要危险来源。

实践中,有以下两种降低商船碰撞风险的有效措施:改善平台信息的发布和启用整合有船舶预警程序的碰撞预警系统。

对于已经处于同一位置多年的平台而言,改进信息的发布在实际中并不实用。因此,平台被识别的概率已经达到了“稳定期”的水平(这里的平台并非下文所列举的“××××”平台)。

应当注意,即使平台是新建的,也可能没有更多的措施来改善平台信息的发布。由于海上交通包括许多来自不同港口的船舶,因此很难在船舶离港前就将平台信息发布出去。所以,唯一的可能性就是由平台自身定时发送预警信号。但这一措施的效果很难评估。

另外一种措施就是启用整合有船舶预警程序的碰撞预警系统。有人曾对此平台配备和不配备预警系统的情况进行了对比计算。结果显示,采用碰撞预警系统并启用船舶预警程序时,总碰撞频率下降超过 50%。通过这些措施,原始碰撞频率由原先的 $1.2 \cdot 10^{-3}$ 下降到了 $5.4 \cdot 10^{-4}$。

10.7 碰撞风险案例研究 Collision Risk Case Study

10.7.1 海上设施 Installation

表 10.9 为“××××”海上设施的输入参数。这个平台被认为刚新建不久

(油气田上的住所数量为 0)。它是一台没有配备工作人员的海上设施,因而无法采取风险降低措施。这是一座 4 根腿柱的钢导管架平台,跨度为 18m。输入数据时,可以指定平台是否长期配备工作人员以及它是否属于海上固定或浮式设施。

表 10.9　××××平台的输入特性

海上设施号:	1			
名称:	××××			
位置和尺寸:纬度	经度	宽/m	长/m	方向
北纬 59° 44′ 5′	东经 2° 33′ 26′	18.00	18.00	45.00°
季节:	全年			
类别:	永久性平台			
住所数量:	0			
有无配备工作人员:	无			
有无风险降低措施:	无			
是否是浮式单元:	否			

图 10.4 是简化的导管架平台侧视图。除了塔柱和桁架外,图中还示出了导管和立管。

10.7.2　航线
Routes

输入 COAST® 数据库中的数据,COLLIDE® 2.6 版识别出了平台附近的 13 条航线。其中,7 条为商船航线,6 条为离岸交通路线,也就是供给船和穿梭油船交通路线。商船航线(以及其年流量)如下:

1) 勒维克(Lervick)至斯塔万格(Stavanger)　35
2) 巴尔迪克(Baltic)至赛迪斯约杜尔(Seydhisfjordur)　18
3) 金奈尔德-赫德(Kinnairds Head)至伯根(Bergen)　9
4) 斯卡布罗(Scarborough)至博德(Bodø)　9
5) 雷斯(Leith)至伯根(Bergen)　18
6) 斯塔特(Stadt)至泰恩/蒂斯(Tyne/Tees)　140

7）东林德斯尼斯(Lindesnes E)至冰岛(Iceland) 120

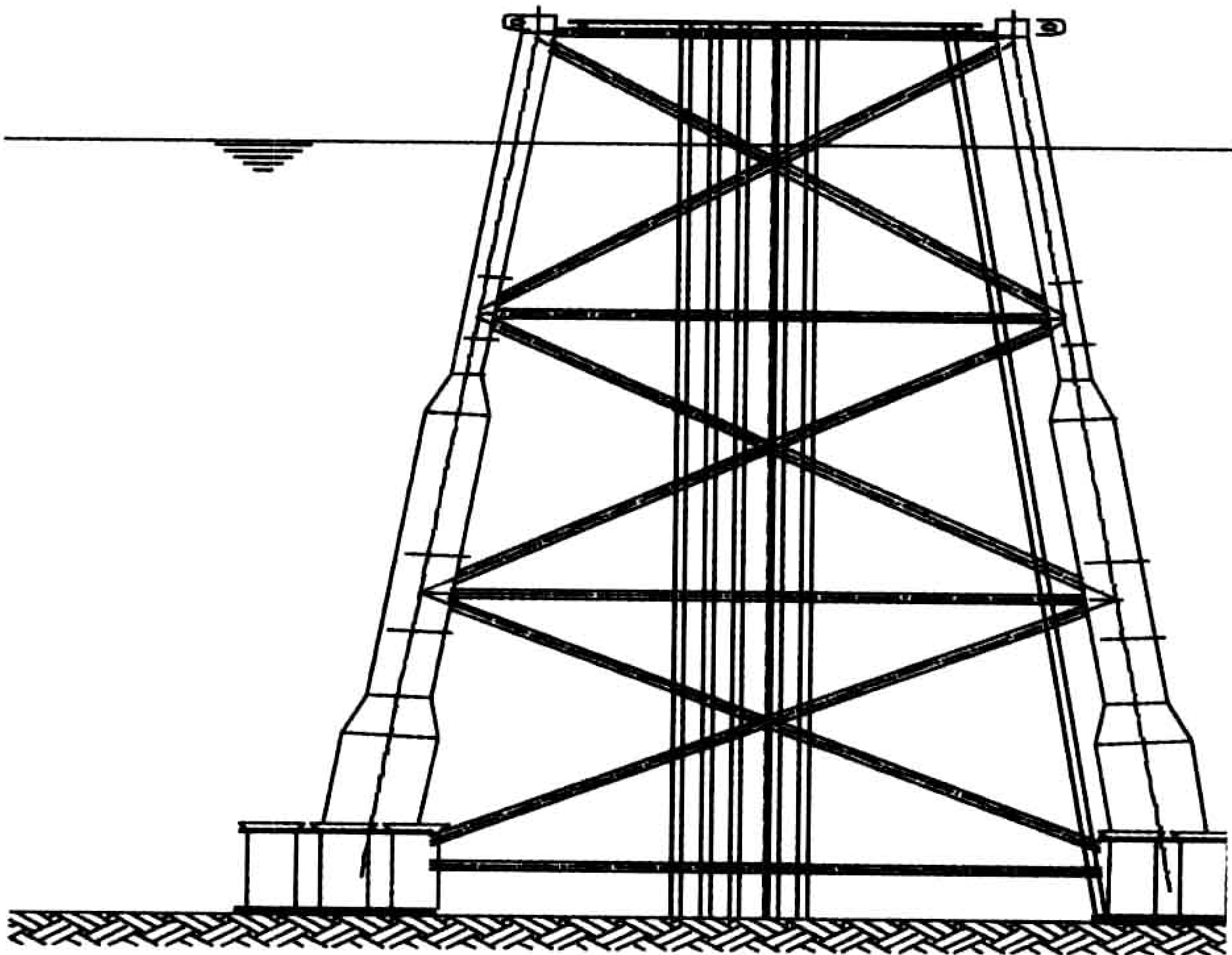


图 10.4　导管架结构侧视图

表 10.10 显示第 1 条航线勒维克(Lervick)至斯塔万格(Stavanger)的相关数据，包括年交通流量的分布、航线的终点、与海上设施的距离以及船舶大小类型分布等信息。对于每种大小类型的船舶，又分为 3 个子类，参数如下：

- 类别内船舶的大小；
- 速度；
- 旗帜；
- 年通过数。

以下是离岸交通航线：

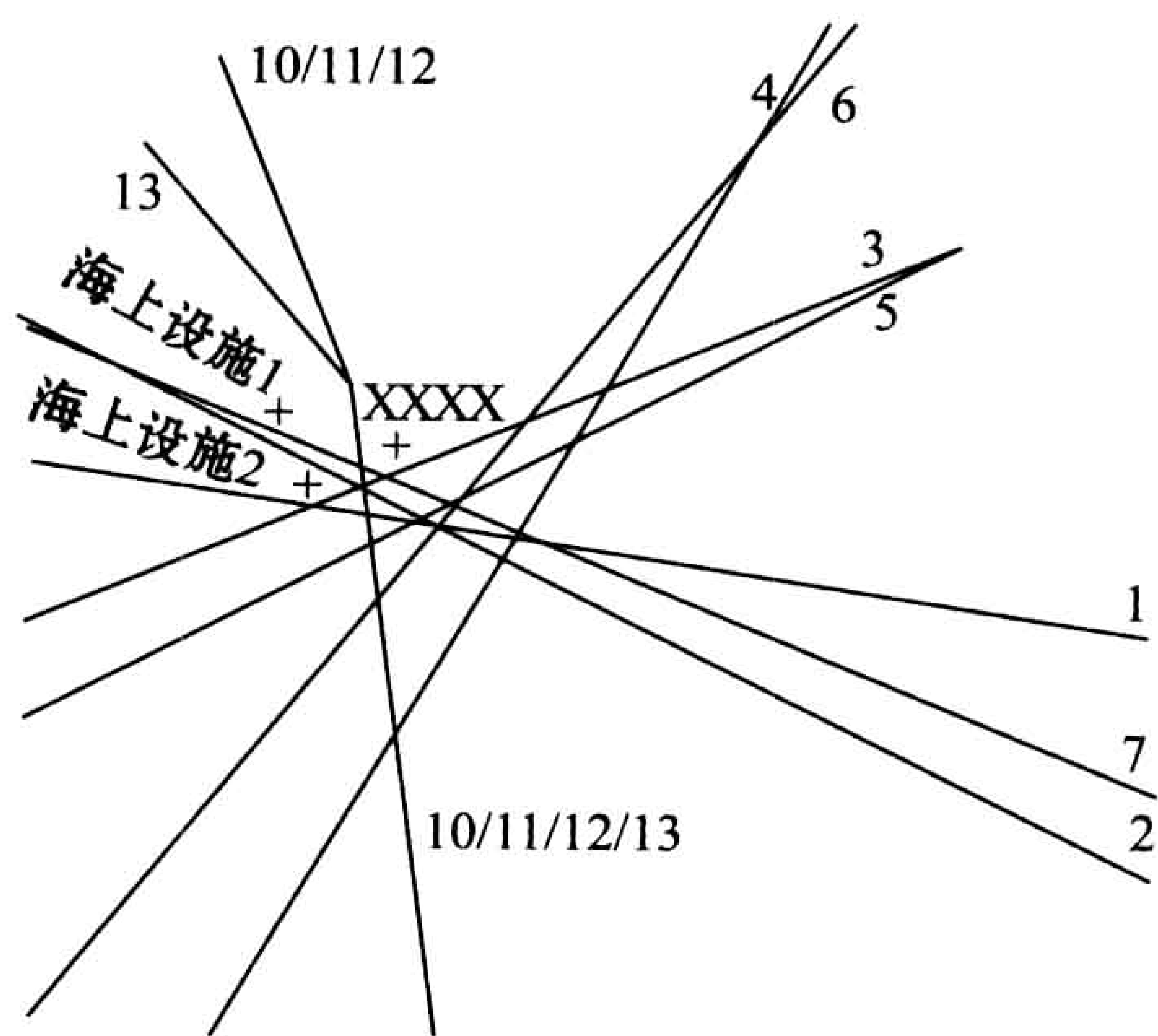
- 弗丽嘉/海姆达尔(Frigg/Heimdal)至斯塔万格(Stavanger) 104
- 奥丁(Odin)至卡尔斯特(Kårstø) 104
- 斯塔约德/加尔法克斯(Statfjord/Gullfaks)至鹿特丹(Rotterdam) 280
- 斯塔约德/加尔法克斯(Statfjord/Gullfaks)至勒阿佛尔(LeHavre) 80
- 斯塔约德/加尔法克斯(Statfjord/Gullfaks)至泰晤士(Thames) 100
- 布伦特(Brent)至鹿特丹(Rotterdam) 100

表 10.10　勒维克(Lervick)至斯塔万格(Stavanger)的航线特征

航线号:1					
名称:勒维克(Lervick)至斯塔万格(Stavanger)					
季节:全年					
分布:高斯分布					
方向:双向					
航线所经位置	纬度		经度	标准差/nm	
勒维克(Lervick)	北纬 60 5′ 0′		西经 1 5′ 0′	2.00	
斯塔万格(Stavanger)	北纬 59 1′ 0′		东经 5 17′ 0′	2.00	
距离××××平台的最小距离	(设备号:1):			12.21nm	
商船	<1 500	1 500～4 999	5 000～14 999	15 000～39 999	≥40 000
年船舶数	26	9	0	0	0
轻型	0.000 000	0.000 000	0.333 333	0.333 333	0.333 333
中型	0.333 333	0.000 000	0.333 333	0.333 333	0.333 333
重型	0.666 667	0.000 000	0.333 333	0.333 333	0.333 333
慢速:5.8kn	0.100 000	0.100 000	0.100 000	0.100 000	0.100 000
中速:9.7kn	0.550 000	0.550 000	0.550 000	0.550 000	0.550 000
快速:13.6 kn	0.350 000	0.350 000	0.350 000	0.350 000	0.350 000
A 类旗帜	0.333 333	1.000 000	0.333 333	0.333 333	0.333 333
B 类旗帜	0.333 333	0.000 000	0.333 333	0.333 333	0.333 333
C 类旗帜	0.333 333	0.000 000	0.333 333	0.333 333	0.333 333
年通过次数<1	0.650 000	0.650 000	0.650 000	0.650 000	0.650 000
1<年通过次数<4	0.150 000	0.150 000	0.150 000	0.150 000	0.150 000
年通过次数>4	0.200 000	0.200 000	0.200 000	0.200 000	0.200 000

前 2 条是供给船航线,而其他为穿梭油船航线。航向和最近距离对于分析都起着重要作用。商船航线中距离最近的是金奈尔德-赫德(Kinnairds Head)至伯根(Bergen)(0.74nm)航线,但是其交通流量很低。离岸航线中与平台距离最近的是往返弗丽嘉/海姆达尔(Frigg/Heimdal)的供给航线(1.30nm)。

图 10.5 是航线的航向简图。需要注意的是,这张示意图的主要用途是显示航线的方向,因此无法从简图中得知海上设施与航线之间的距离。



10.5 ××××海上设施周围的交通航线简图

INST-1　　海上设施 1

INST-2　　海上设施 2

××××海上设施附近还有 2 个其他海上设施,如图所示,海上设施 1 和海上设施 2。这 2 个海上设施配备有工作人员以及随时待命的守备船,可对迫近船舶进行拦截。请注意,关于附近这 2 个平台的碰撞风险在这里不做讨论。图 10.6 是图 10.5 中所示同一区域的 COAST® 实际输出图。

10.7.3 结果
Results

表 10.11 所示为总体碰撞结果。从表中可以明显看出,因失控或失灵船舶造成的正面碰撞在风险场景中占相当大的比重。

表 10.11 ××××平台碰撞结果

碰撞模式	年频率
正面	$6.6 \cdot 10^{-4}$
漂移	$1.3 \cdot 10^{-5}$
全部模式合计	$6.7 \cdot 10^{-4}$

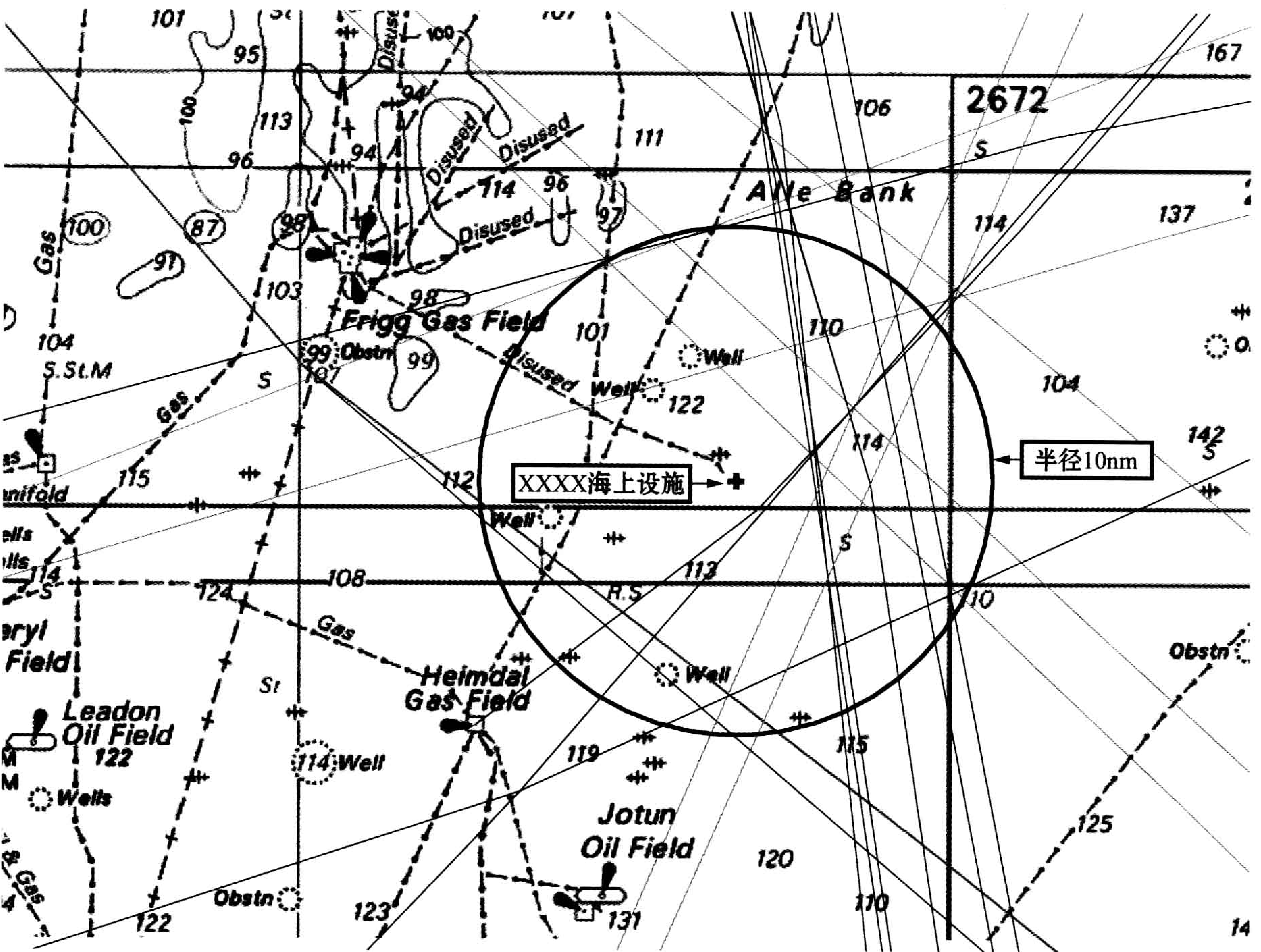


图 10.6　××××海上设施附近同一区域的 COAST® 交通输出图

以下是引起总体碰撞风险的各类船舶所占比重：

- 商船：56.6%；
- 供给船：39.7%；
- 穿梭油船：3.7%。

正面碰撞占据总体风险的比例超过98%，因此在此只对正面碰撞做进一步分析。

10.7.4 能量分布 Energy Distributions

可以对所有碰撞船舶或分别对每一种船舶来分析频率相对于能量的分布情况。第2章图2.14显示所有碰撞船舶的分布情况。但实际上，对于每一种船舶的分布分别进行具体分析可能会更加直观，因为不同船舶的分布情况存在很大差异。图10.7～图10.9是具体的分布情况：

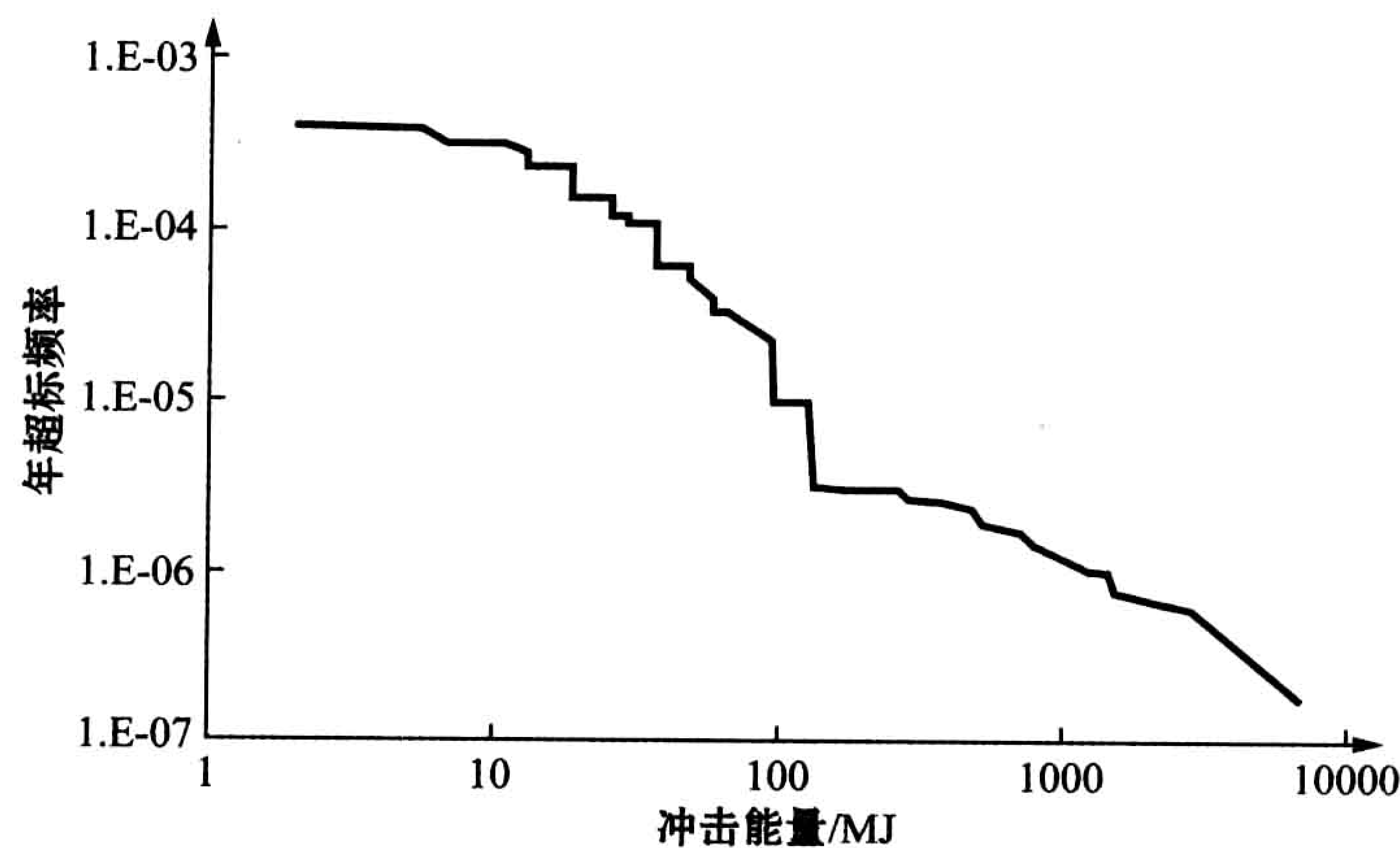


图10.7 商船的超标曲线

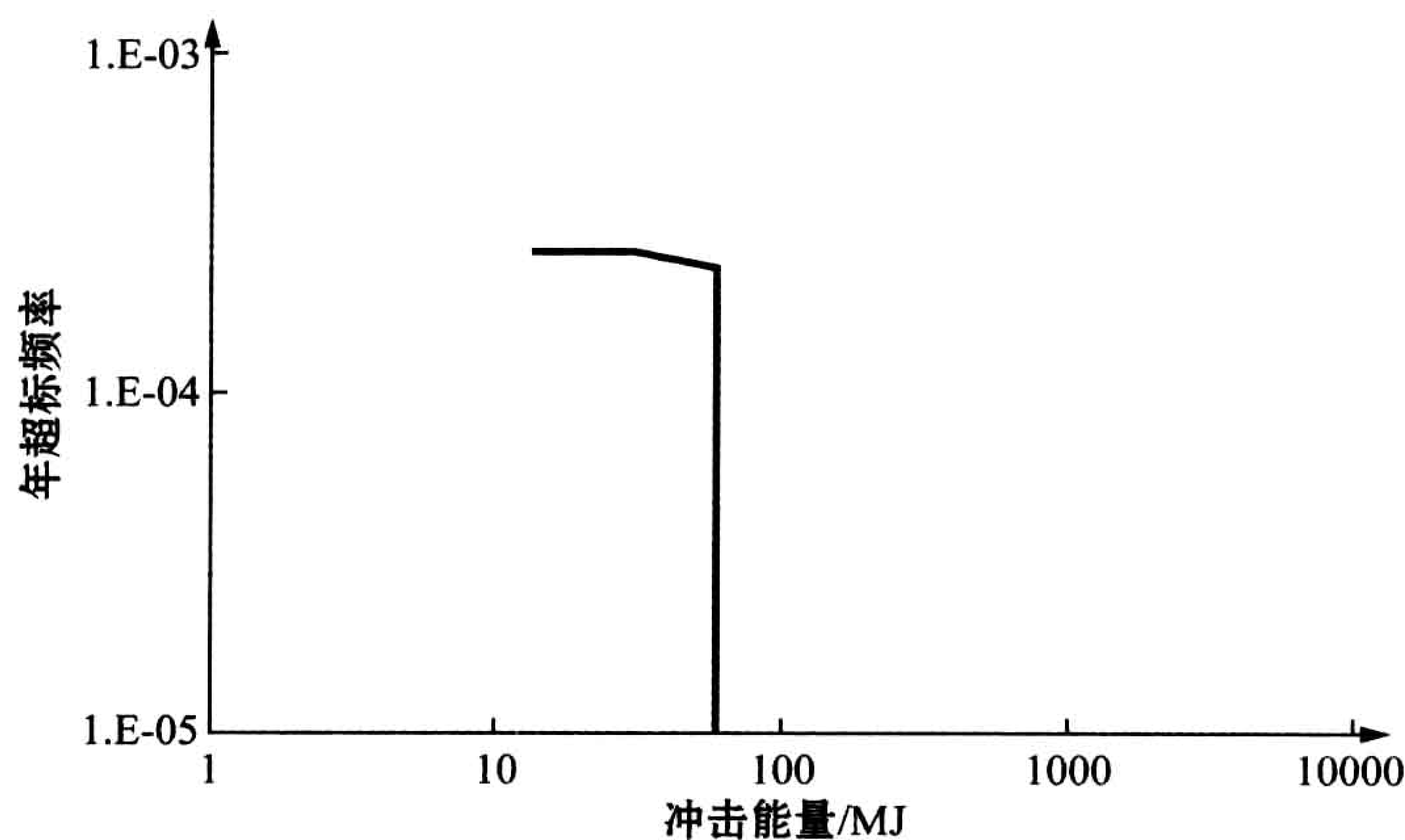


图 10.8　供给船的超标曲线

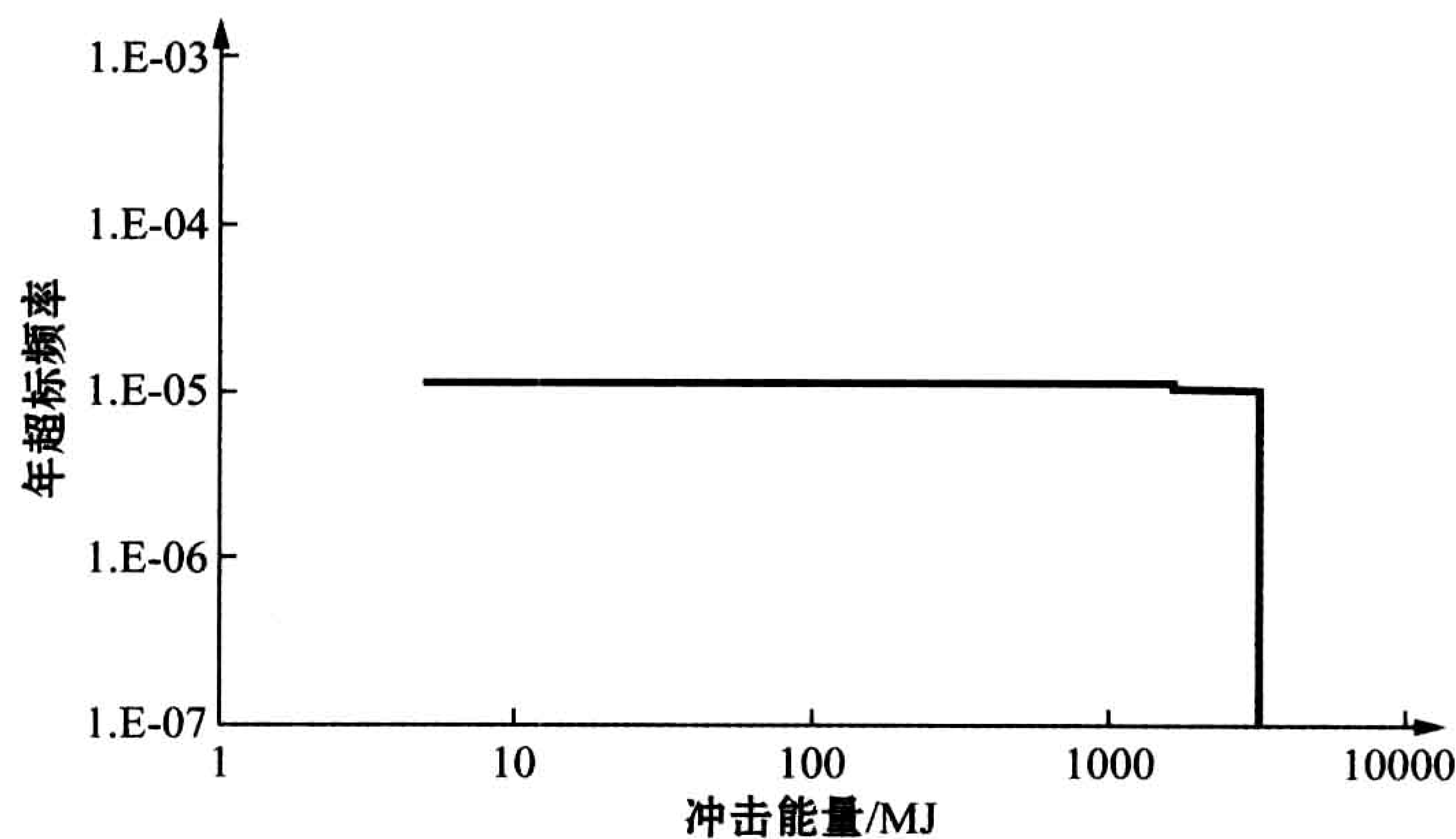


图 10.9　穿梭油船的超标曲线

10.7.5　干预选择 Intervention Options

本节讨论没有配备人员的××××海上设施降低碰撞风险的可能性。假设实践中使用了有效的雷达预警,但不考虑此类预警的技术要求如何达到。

下面将简单讨论使用海上设施 1 和海上设施 2 的守备船对失控或失灵船舶进行拦截(不一定需要发生船体接触)的可能性。假设距离平台约 20nm(对于速度最快的船舶,即潜在碰撞发生前约 90min 时船舶与平台之间的距离)时进行预警。

航线 2	东南航向	海上设施 1(或者海上设施 2)的守备船可以拦截船舶；
	西北航向	海上设施 2 的守备船可以及时拦截迫近船舶。
航线 3	西南航向	守备船都没有处于拦截船舶的有利位置；
	东北航向	海上设施 2 的守备船可以及时拦截迫近船舶。
航线 6	西南航向	守备船都没有处于拦截船舶的有利位置；
	西北航向	海上设施 2 的守备船可以及时拦截迫近船舶。
航线 10、11、12、13		
	东南航向	海上设施 1 的守备船可以拦截船舶；
	东北航向	海上设施 2 的守备船可以拦截船舶。

以上讨论并不能说明守备船是否可以通过船体接触来拦截穿梭油船。但是穿梭油船的无线电联络应该是畅通的，因为人们认为无论何时穿梭油船的舰桥上总是配备有船员。

对于其他航线，就以下大小类型的船舶而言，守备船进行有效拦截的可能性很大：

- 航线 2：所有船舶都小于 5 000dwt；
- 航线 3：所有船舶都小于 1 500dwt；
- 航线 6：98%的船舶小于 5 000dwt，2%的船舶超过 15 000dwt。

假设每个方向上船舶通过次数相同。(COAST® 中其实包括了这方面的航线数据。)由于守备船的行驶时间较长，那么航线 3 和航线 6 上半数的通过船舶就无法得到有效拦截。

做一个简单的假设，只要存在拦截的可能性(不发生船体接触，而是封堵航道等拦截措施)，就能够解除风险，那么发生以下场景时风险仍然存在：

- 航线 3　　西南航向；
- 航线 6　　西南航向。

通过这个方法，航线 2、10、11、12、13 的两个方向以及航线 3 和 6 的东北航向向上的风险都得以解除。

10.7.6 碰撞几何 Collision Geometry

图 10.10 是与主要航线(即航线 6)有关的重点支撑结构的方位图。首先应当注意，航线几乎和支撑结构的一边平行。边缘角忽略不计。

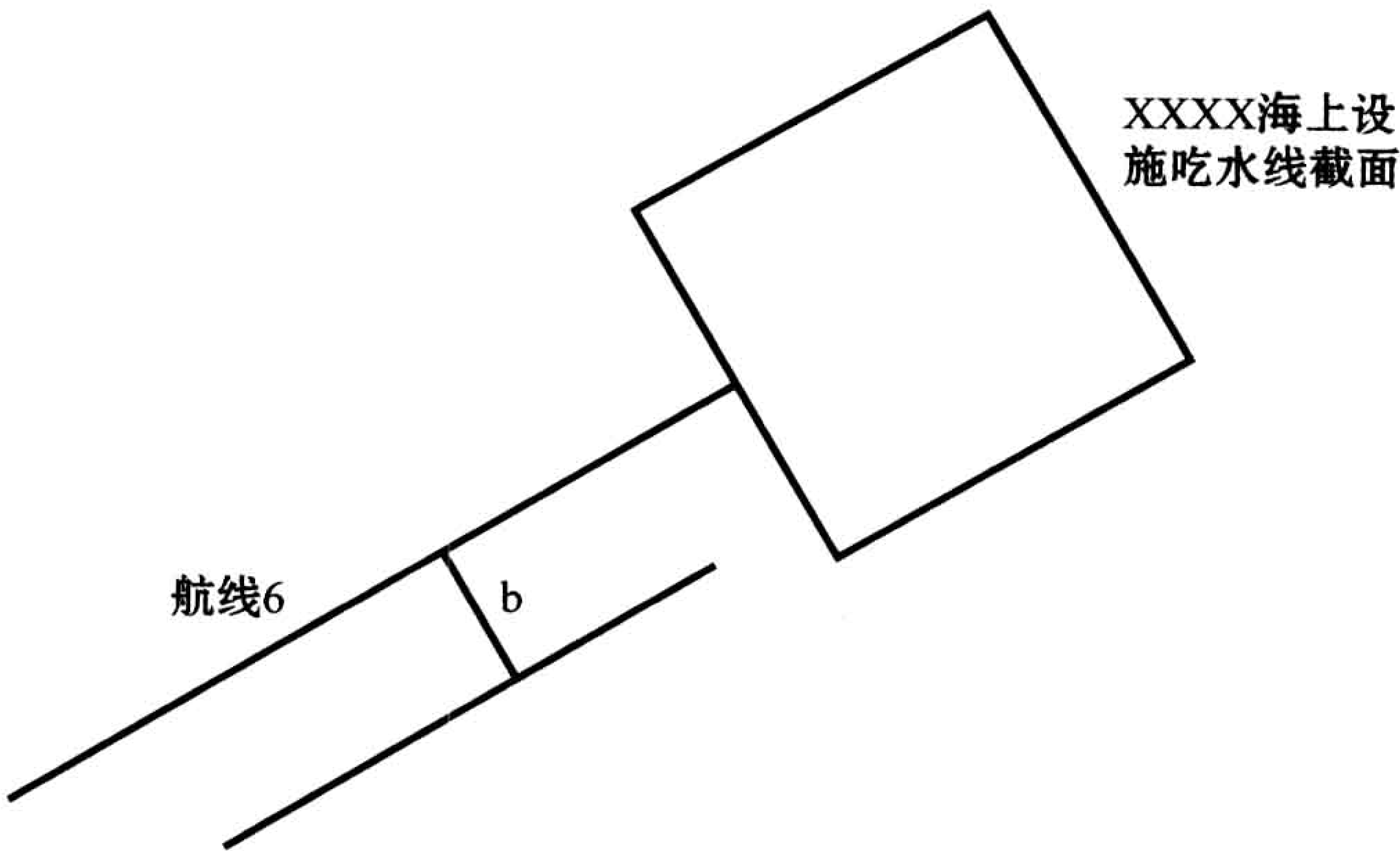


图 10.10 与航线 6 有关的建筑物方位图

吃水线的截面面积为 $18\times18\text{m}^2$。两条航道中轴线表示出了中心线位置以及与平台发生正面碰撞的临界位置。距离 b 的计算公式是：

1/2 平台宽度＋1/4 船型宽度＝9＋3＝12m

1 500～2 500dwt 船舶典型宽度一般为 12m。如图 10.10 所示，发生支柱碰撞的中心区域的一半宽度为 3m。发生撞击的区域总宽度为 18＋12＝30m。这个区域又可以划分为以下几个部分(区域的宽度与航道中轴线垂直，负值表示在中心线的右轴，正值则在中轴线左侧)：

- －15～－12： 边缘碰撞；
- －12～－3： 角柱碰撞；

- －3～3：　　　　支柱碰撞；
- ＋3～＋12：　　　角柱碰撞；
- ＋12～＋15：　　　边缘碰撞。

假设整个区域中撞击概率恒定不变。那么当碰撞发生时，碰撞场景的条件概率为：

- 侧击碰撞：20％；
- 角柱碰撞：60％；
- 支柱碰撞：20％。

基于以上场景，如图 10.11 所示，可以建立碰撞场景以及后果的事件树。以上讨论的每一种场景都必须分为导管架结构的局部失效、连续失效和完全倾翻（基座失效）等多种后果加以区分。事件树的终端事件的特征可能是：

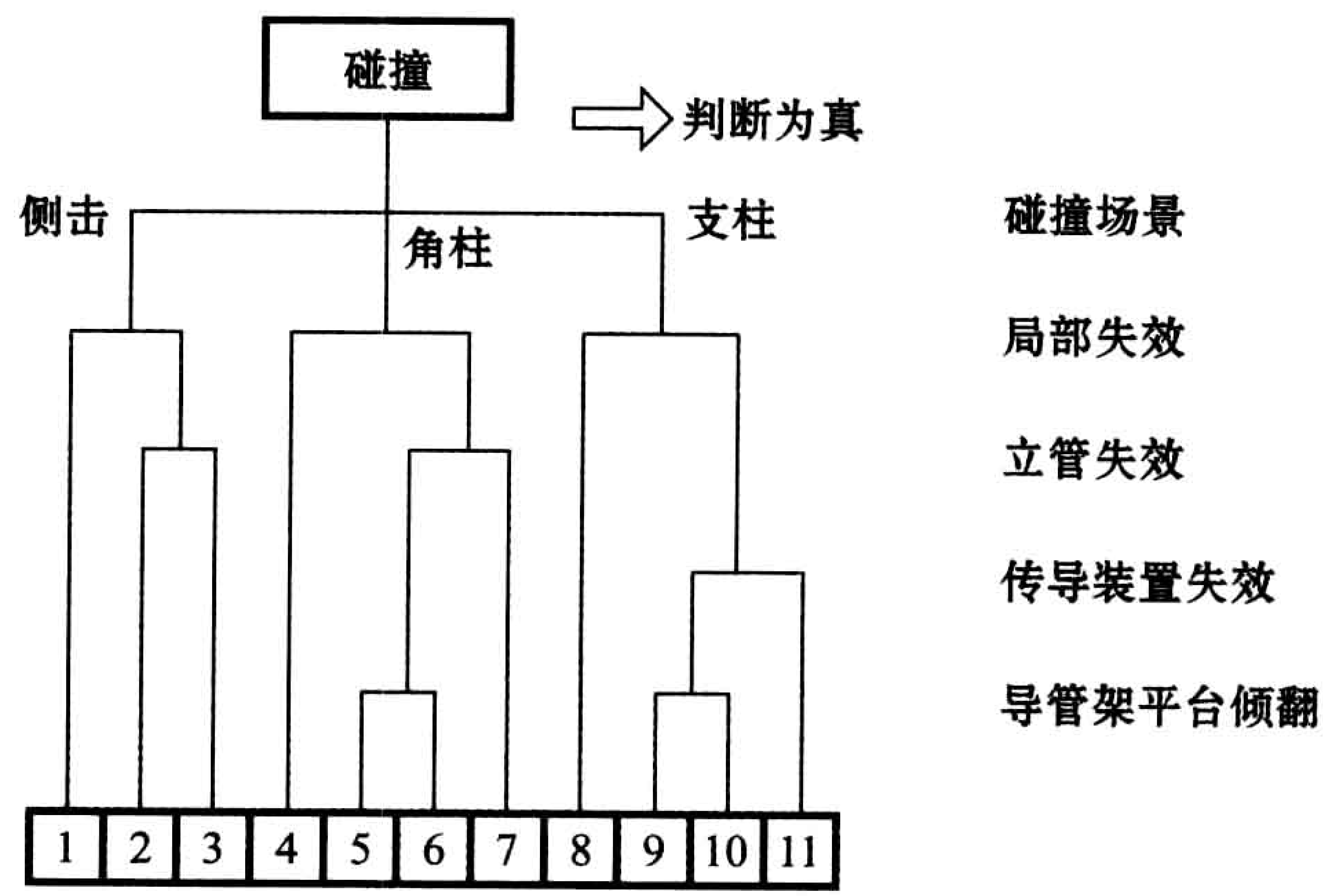


图 10.11　碰撞场景以及后果的事件树

- 节点 1、4、8：　　局部失效；
- 节点 2、6、10：　 由于立管或者传导装置破裂引起无法控制的火灾；
- 节点 3、7、11：　 临界结构性失效，但承载能力未受到破坏；
- 节点 5、9：　　　导管架平台倾翻。

在前文中已经确定了碰撞场景(事件树的第一层分支)的条件概率。现在以航线 6 为例,通过适用方法确定其各种受损程度的概率。图 10.12 为航线 6 上冲击能量的条件概率分布。

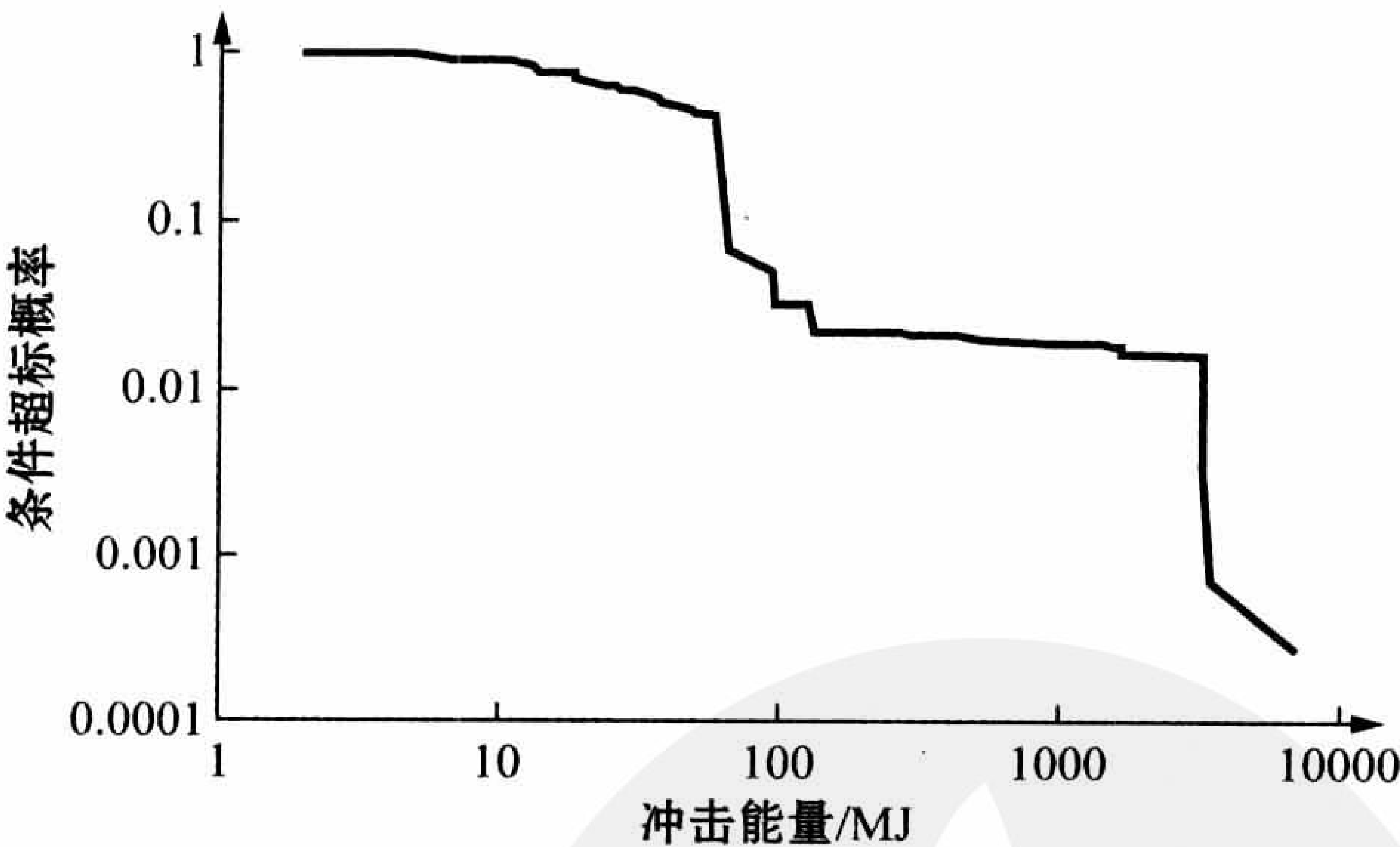


图 10.12　航线 6 的条件超标概率

对于这里所讨论的导管架平台,以下能量级数被确立为临界值:

- 3MJ:　撑柱塑性失效;
- 8MJ:　多根撑柱塑性失效;
- 14MJ:　角柱塑性变形,但是仍能抵御百年一遇的风暴;
- 40MJ:　腿柱严重塑性变形,无法抵御百年一遇的风暴;
- 60MJ:　导管架平台倾翻。

这些能量级数也适用于建筑物吸收的能量。但应注意,在很多碰撞中船舶会保留一些能量。因此,我们进行以下假设:

- 角柱碰撞:船舶保留 25%的能量;
- 侧击碰撞:船舶保留 75%的能量;
- 支柱碰撞:船舶保留 40%的能量。

从图 10.12 中可以获得对应平台不同受损等级的冲击能量条件概率。为了保证数据的精确性,表 10.12 中引用了经软件计算所得的内插值。

表 10.12　航线 6 的能量级数以及条件超标概率

场景 / 失效情况	临界失效能量/MJ	角柱		支柱撞击		侧击	
		MJ	概率	MJ	概率	MJ	概率
失效情况	8	不适用		13.3	0.528	不适用	
多根支柱角柱	14	18.7	0.365	不适用		56	0.102
立管/导管失效	50	67.7	0.0803	83.3	0.06	200	0.01
整体倾翻	60	80	0.0667	100	0.03	240	0.01

表 10.13 总结了航线 6 的各种结果。因失效造成全损的年频率(即表 10.14的第二行与第三行之和)为 1.94×10^{-5}。

表 10.13　航线 6 的事件树计算结果

后　果	给定碰撞的条件概率	年频率
局部失效(节点 1、4、8)	0.655	$2.03\cdot10^{-2}$
由于立管或传导装置破裂引起无法控制的火灾(节点 2、6、10)	0.0165	$5.13\cdot10^{-6}$
临界结构性失效,但承载能力未受到破坏(节点 3、7、11)	0.282	$8.75\cdot10^{-5}$
钢导管架平台倾翻(节点 5、9)	0.0462	$1.43\cdot10^{-5}$

第 11 章　船用系统风险建模

Marine Systems Risk Modelling

离岸石油工业目前出现了新的发展动态，越来越多的浮式生产设施与水下生产系统取代安装在水面的设施。水下生产系统也已全面使用海上浮式设施，通常为移动式钻井平台。

目前的大背景是船用系统的可能故障已得到越来越多的关注，这些系统包括压载系统、锚泊系统、浮力损失系统、重量控制系统以及结构与船体系统。本章将对这些系统的风险建模进行论述。

11.1 压载系统故障 Ballast System Failure

11.1.1 背景 Background

挪威海域未发生浮力损失或稳性损失等严重事故或偶发事件已经持续 25 年了。但是其他海域仍时有事故或偶发事件发生，这提醒我们这一危险并未杜绝。这一类型中最严重的事故当属 1982 年在纽芬兰岛附近的“海洋突击者”号半潜式钻井平台发生倾覆并全损。

11.1.2 监管要求 Regulatory Requirements

本章涉及的监管要求指那些适用于对与浮力损失和稳性损失相关的可靠性、脆弱性以及风险分析的监管要求。

压载系统设计和浮式平台稳性需要满足一定的要求。而对这些系统的概率/风险分析的要求则并不明确。平台残存性参见词组“主支持结构”，在设施规范(PSA，2002a)第 6 条中被定义为主安全功能。设施规范第 10 条对可能影响主安全功能的载荷频率做出了限制。健康、环境与安全(HES)管理规范(PSA，2002b)则要求对主安全功能进行量化风险评估研究。

设施规范指挪威海事管理局(NMD)针对移动式平台压载系统的详细规范要求以及针对稳性与水密隔舱的规范,也即挪威海事管理局(NMD)风险分析规范。这些规范对压载系统的概率/风险分析并无明确要求,但是对证明符合规范有要求,而这可以通过风险分析或可靠性分析实现。

11.1.3　相关危险
Relevant Hazards

稳性损失可能由单一故障造成,但更可能由移动式平台以及浮式生产设施故障共同造成,包括:

- 压载系统故障,包括泵、阀门和控制系统;
- 压载系统操作故障;
- 内部水源(例如消防水或水罐)错误或误操作导致出现浮力体积充填或甲板体积被水充填;
- 碰撞冲击造成进水,导致出现浮力体积充填;
- 设计或构造错误导致出现浮力体积充填;
- 火灾或爆炸导致出现浮力体积充填或甲板体积被水充填,包括消防水;
- 泵房注水;
- 甲板上放置重物(SS);
- 锚索故障或锚索制动器故障导致重物损失(SS);
- 转移移动式平台时出现压载系统故障或误操作(JU);
- 加载系统故障,导致出现异常权重条件(FPSO);
- 加载系统作业过程中出现故障,导致出现异常权重条件(FPSO);

上述前 7 条基本上适用于所有浮式概念,最后 5 条专门针对以下概念:SS——半潜式采油平台;JU——自升式采油平台;FPSO——浮式生产储卸装置船。

11.1.4　既往研究
Previous Studies

关于浮力损失风险评估(RABL)的研发项目始于上世纪 80 年代中期

(Vinnem et al.，1987)。该项目研发出一种基于事件树与故障树的压载系统故障分析方法。实际上在浮力损失风险评估项目结束后的近20年里，并没有对浮力损失或稳性损失开展任何相似的详细研究(Vinnem et al.，2006a)。

量化风险评估研究中经常采用的方法参见第11.1.7节。Lotsberg et al.(2004)采用的则是另一种量化风险评估研究替代方法。挪威海域的Kristin油田采用的方法参见图11.1。

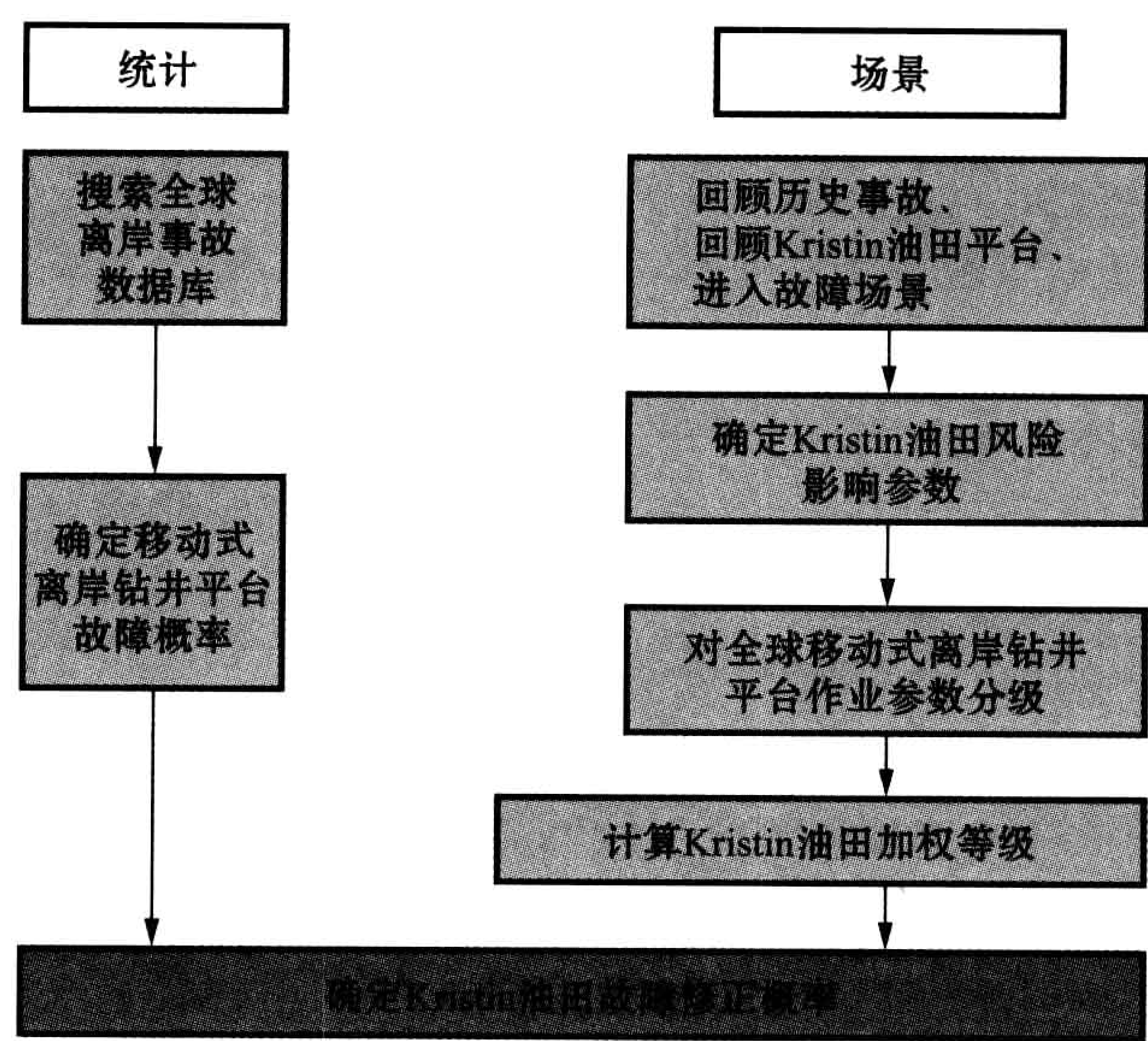


图11.1　基于严重错误的故障频率评估方法(Lotsberg et al，2004)

相比目前正在采用的传统量化风险评估方法，该方法有所改进。其仅有的一点不足之处在于无法识别出风险降低方法及其效果。

11.1.5　当前的稳性偶发事件和意外事故 Recent Stability Incidents and Accidents

11.1.5.1　北海事件 North Sea Events

在过去20年中，北海、北大西洋和挪威海域发生了一起全损事件，即“西伽

马”号自升式钻井平台于 1989 年注水并沉没。健康与安全管理局（HSE）（2005b）和 Vinnem et al.（2006a）记录下了多起小型偶发事件，在造成严重后果之前就已对设备故障或误操作进行了纠正。最严重的偶发事件包括：

- 绞车故障导致损失两根锚索，造成 160m 被动漂移以及约 10°瞬间倾斜；
- 压载控制系统故障，导致在钻井装置被立起之前出现长达 90min 时间的 9°横倾；
- 主电源损失导致集水系统激活，造成 6～8°倾斜；
- 控制台故障导致压载阀打开，造成未知角度倾斜。

11.1.5.2　全球范围内的事件 Worldwide Occurrences

在全球范围来看，开展的作业中曾发生过一些较为知名的事件，能够为评价提供重要依据，它们是：

- “海洋突击者”号半潜式移动式钻井平台，1982 年 2 月 15 日（见第 4.12 节）；
- “西伽马”号自升式钻井平台，1989 年 8 月 21 日（见第 4.15 节）；
- “海洋开拓者”号钻井平台，1995 年 8 月 14 日；
- P-36 浮式生产平台，2001 年 3 月 15 日（见第 4.17 节）；
- P-34 浮式生产储卸装置，2002 年 10 月 13 日（见第 4.18 节）；
- “雷霆马”号半潜式采油平台，2005 年 7 月 11 日。

1982 年 2 月 15 日，“海洋突击者”号半潜式移动式钻井平台在加拿大海域倾覆，关于该倾覆事件的发生顺序见第 4.12.1 节。

1995 年 8 月 14 日，“海洋开拓者”号钻井平台在两个非洲港口之间拖曳时发生倾覆并最终沉没，没有人员丧生。调查报告显示，进行压载作业的操作人员缺乏经验可能是导致事故发生的原因之一。

P-36 浮式生产平台（见第 4.17 节）在巴西 Roncador 油田倾覆并沉没。某塔中一个破裂的排水罐引发爆炸，摧毁了一根消防水管道，造成 11 人死亡，并致使水密舱、泵房和推进器房进水。

P-34 浮式生产储卸装置(见第 4.18 节)因电气故障造成压载与加载系统故障,出现了较为严重的横倾。在船舶重新受控前已接近倾覆。所幸没有造成人员死亡。

2005 年,在墨西哥湾丹尼斯飓风过境之后,工作人员再次登上"雷霆马"号半潜式采油平台时,发现其横倾约为 20°,致使左舷上甲板没入水中(MMS, 2005)。进水/横倾的精确来源/原因尚未确定;但是初步调查结果显示,通道空间内出现经由发生故障的多管穿线板(MCT)的水流。多管穿线板是水密舱壁的核心,因为传输电源与仪表信号的电缆会穿过水密舱壁。究其本质,多管穿线板就是包覆在电缆上起密封作用的塑料模压块。故障就发生在装有这些压块的空间里。特别需要注意的是,该初步调查结果指出,导致发生故障的原因可能是因为没有正确安装多管穿线板,即安装步骤错误,或者是因为没有根据所使用配置设置正确的压力等级。

11.1.6 分析偶发事件和意外事故得到的结论 Observations from Incidents and Accidents

根据 Vinnem et al. (2006a)对全球意外事故和偶发事件的论述,图 11.2 对稳性故障发生的原因进行了总结,其中小型故障不包括在内。该图明确指出,阀门故障是导致外事故和偶发事件发生的主要原因。我们还可以看出,操作故障是导致两起全损事故发生的原因。此外,该图还表明,58%的意外事故、偶发事件和小型故障与技术问题有关。这一比例之高极不寻常。

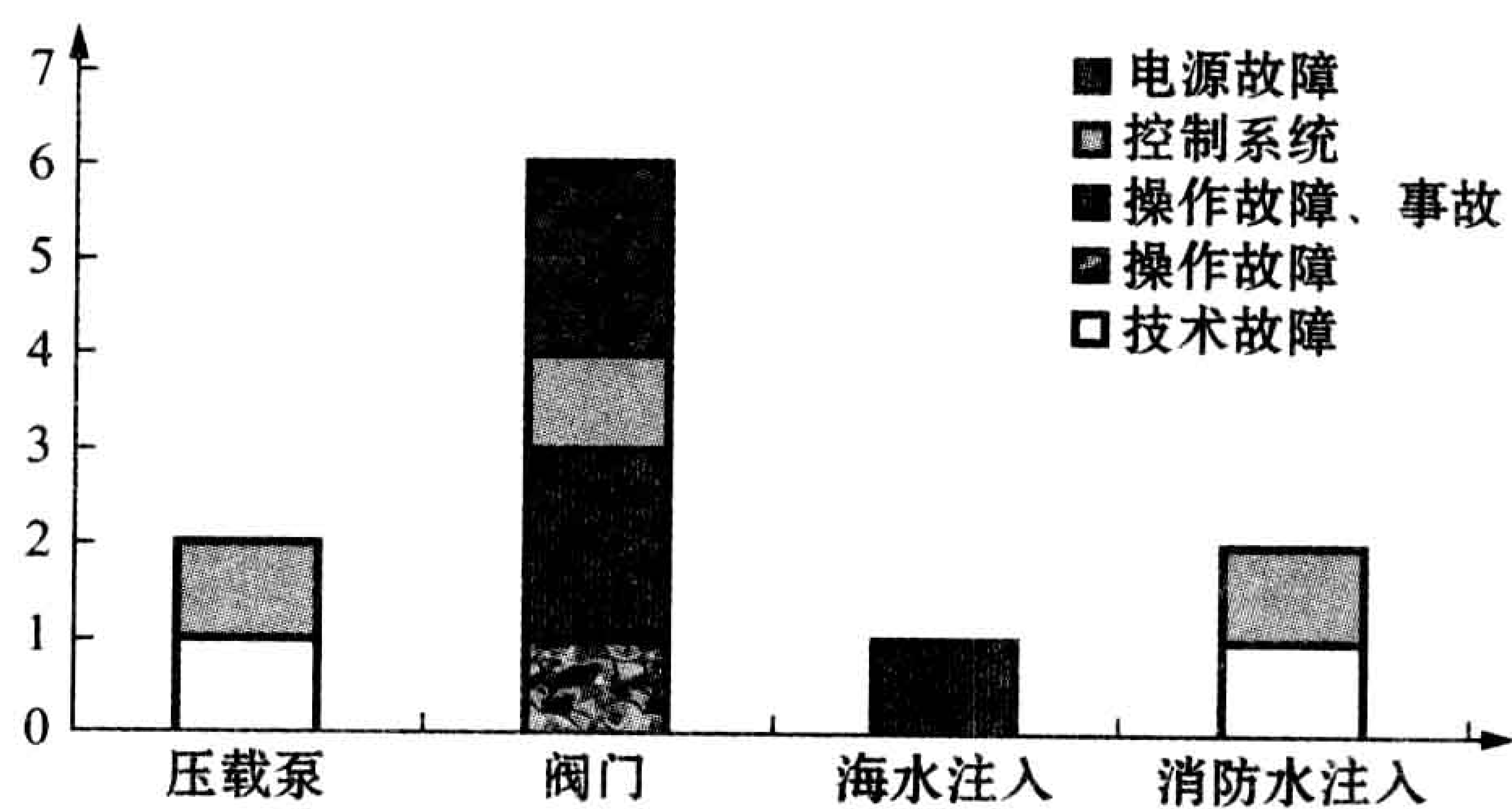


图 11.2 稳性故障原因分布

11.1.7　对典型的量化风险评估研究的评价 Evaluation of Typical QRA Studies

当前已经对挪威移动式平台与浮式生产平台的量化风险评估研究进行了调查(Nilsen,2005)。调查结论指出,目前开展的量化风险评估研究既不适用于识别可行的降低风险措施,也不适用于对此类风险水平措施的效应进行量化。大多数研究的不足之处在于:

- 没有对事故场景建模。对可能出现的故障分类还流于表面,无法识别场景可能如何发展。
- 完全没有将若干故障机制考虑在内,例如火环总线破裂、甲板上重型载荷明显移动、操作人员在压载或加载作业中出现失误以及碰撞冲击导致进水。
- 没有将经验数据考虑在内。部分数据在上文中有所提及,并在 Vinnem et al.(2006a)中进一步进行论述。而通常,量化风险评估研究不将这些经验数据考虑在内。
- 没有提及假定、前提和简化。挪威石油安全管理局(PSA)规范要求对假定与前提进行记录,且假定与前提要能够被追踪。而大多数研究不符合这一要求。
- 得出的结果无法被追踪。部分研究完全没有得出任何量化结果,而仅限于得出“设计可以认为是安全的”这样一个结论。从透明度角度来说,这实际上没有任何意义,因为完全无法对如何得出该结果以及局限性和基本假定有哪些进行记录。

11.1.8　建议的稳性危险分析方法 Proposed Approach to Analysis of Stability Hazards

11.1.8.1　生命周期阶段 Life Cycle Phases

主要分析工作应当在设计与工程阶段开展,以便顺利采取风险降低措施。

而分析的修正则可在建造阶段结束之后进行，有时也可在作业过程中进行。当采用非传统概念与解决方案时（包括规范与标准中未涉及的解决方案），详细研究就显得尤为重要。

研究还应当涉及可能出现的特殊情况，例如重型载荷移动、消防水环主管破裂以及当门和检修孔打开或系统停用时在检验与维护过程中出现的特殊情况。

11.1.8.2 分析方法 Analytical Approach

Vinnem et al.(2006a)提出了一种分析方法，该方法根据 Haugen(2005)的分析方法修正而来，推荐使用该方法。

收集经验数据应当作为分析的第一步，之后应进行危险识别(HAZID)，以便识别出可导致临界后果的场景，尤其是在涉及故障案例组合与作业错误影响时。

应当针对临界场景进行详细分析，但仅限于船用系统或可能影响船用系统的系统。如果已经开始故障模式影响与危害度分析(FMECA)和/或任务分析，则这些分析可作为详细分析的第一步，包括故障树与事件树在内。

故障树与事件树可用于计算风险值，并识别出最有效的变更（风险降低措施），以便改进状况。在这部分分析中，应当尽力对与以下方面相关的假定和前提进行记录：

- 技术条件；
- 作业与维护相关条件；
- 分析方法论与建模相关假定。

管理规范(PSA et al.，2002b)中的一项总体要求是，要考虑所有风险元素的不确定性，不仅仅是船用系统。通常，利用敏感性研究来研究假定和前提中有关的数据和差异可最有效地满足这一要求。

11.1.8.3 压载系统故障的详细分析 Detailed Analysis of Ballast System Failures

图 11.3 中给出的方法应当被用于分析因压载系统部件故障造成的风险。这意味着所采用的方法与浮力损失风险评估(RABL)项目开发出的方法相同。该方法的主要元素为故障树与事件树；参见图 11.4 和图 11.5。选择该方法的

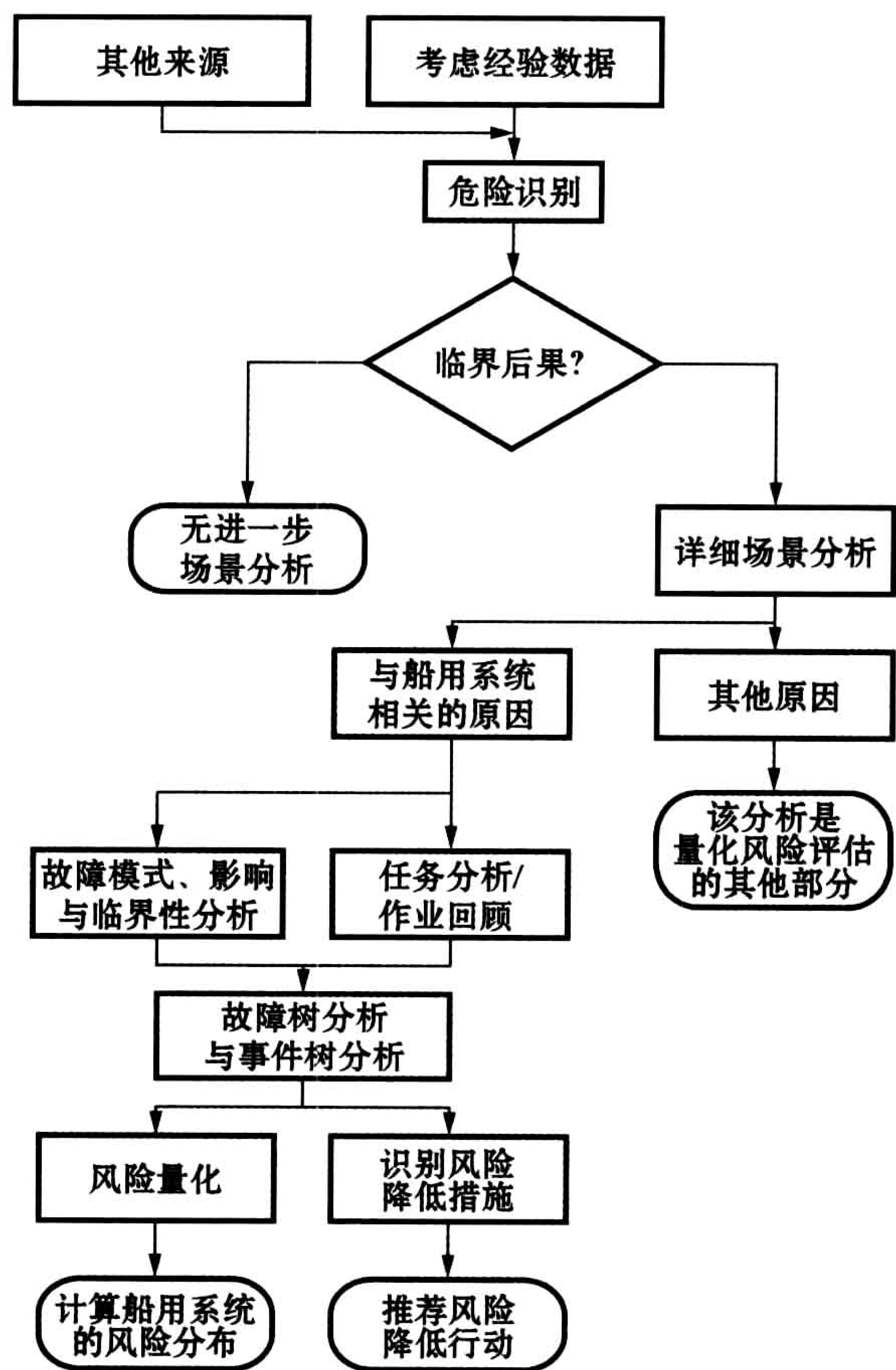


图 11.3　建议使用的船用系统分析过程

意义在于,可以详细识别出那些最有效的系统变更与操作变更,以降低风险水平并减轻这些行动可能产生的影响。

这是管理规范(PSA et al., 2002b)中的一项重要要求。识别出可行的风险降低措施也是证明最低合理可行原则(ALARP)的一项重要元素,这在挪威与英国规范中都是至关重要的。除了浮力损失风险评估项目提及的方法外,还应当采取以下行动:

- 还应当针对事件树中最临界的节点进行故障树分析,实例参见图 11.5;
- 人员和组织错误;
- 普通模式故障与关联性。

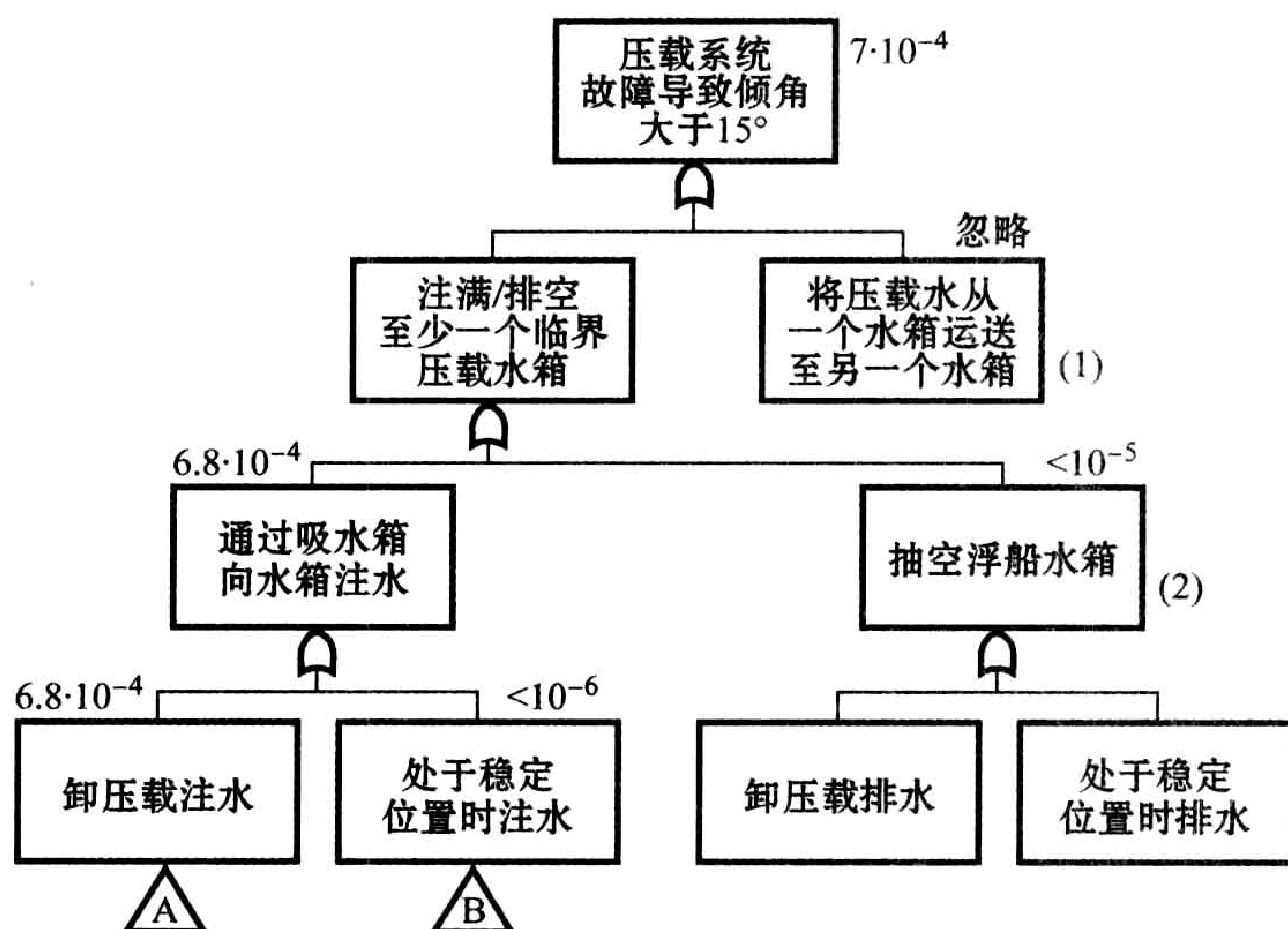


图 11.4　用于压载系统分析的故障树顶层实例(Vinnem et al. 1987)

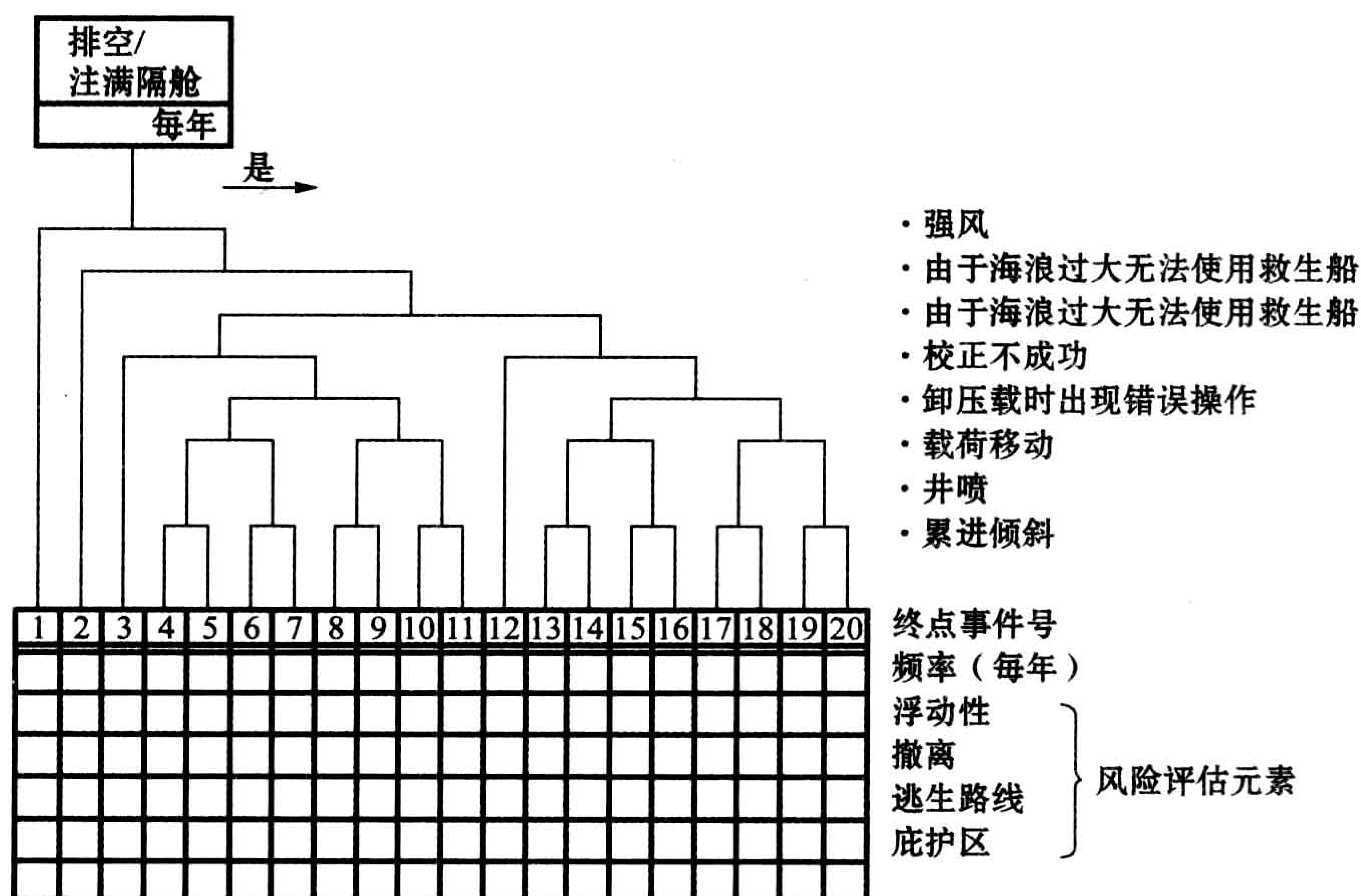


图 11.5　压载系统分析事件树(RABL)

根据情况，可能需要开展碰撞风险详细分析，作为分析输入数据。此外，除了浮式生产储卸装置加载过程中出现的故障外，还要求对疲劳故障进行详细分析。

11.1.8.4 其他故障 Other Failures

可采用 Lotsberg et al.（2004）推荐的方法对经图 11.3 中的方法分析后认为不属临界的其他故障进行分析，参见图 11.3。该方法的不足之处在于不能够识别出风险降低建议。

11.1.8.5 人员和组织错误分析 Analysis of Human and Organizational Aspects

可以采用屏障与作业风险分析等方法在相关故障树分析中对人员和组织错误进行分析（Sklet et al.，2005，Vinnem et al.，2006c）。

11.1.8.6 屏障关联性分析 Analysis of Dependencies in Barriers

应当对普通模式故障与关联性进行恰当分析。故障树分析中包括针对这两方面的标准分析方法，通常用于核电站故障分析。但是对于海上设施，尚未形成对这两方面进行分析的惯例。

11.1.8.7 屏障分析 Analysis of Barriers

除了触发事件外，还有若干种情况可导致事件逐步升级，这包括船体分舱不科学、甲板排水能力不足、泄漏探测系统缺失或出现故障、泵送能力不足、缺少具备应急救援经验的工作人员或门和检修孔打开。

挪威管理规范第 15 条规定，量化风险评估应当对事故序列与后果建模，以便明确物理屏障之间可能存在的关联性，同时对必须设置的屏障性能需求进行计算。Ersdal and Friis-Hansen（2004）论证了一项分析屏障稳性的方法。

11.1.8.8 方法论述 Discussion of Approach

“亚历山大·基尔兰德”号浮式住宿船于 1980 年倾覆，这是发生在挪威大

陆架上的最后一次关于浮力损失或稳性损失的严重事故。1989年，“西伽马”号自升式钻井平台在从埃科菲斯克油田开始拖曳的过程中倾覆并沉没。该意外事故发生在丹麦海域，而平台最终沉没于德国海域，没有造成人员死亡。但近年来，的确也发生了一些很可能升级为严重事故的虚惊事件。

大多数专家认为，采用传统风险分析方法无法对平台设计与建造过程中出现的严重错误进行分析。对此进行全面分析已超出此处讨论的范围，但似乎在船用系统危险分析中也已认同这一观点。这其实是一种误解。

设计与建造默认值分析和船用系统故障分析之间几乎不存在相似性。设计与建造严重错误属于可危及结构完整性、并阻止力量再次分布以校正局部故障的事件。采用传统风险分析方法难以对其进行分析。单一故障即可造成严重错误。

压载系统等船用系统之间差别很大，冗余和可能存在的关联性对于分析故障事件组合而言非常重要。传统风险分析方法，例如故障树与事件树或相似的方法，可用于分析此类场景。推荐按照图 11.3 中提供的方法分析船用系统，包括危险识别、故障模式影响与危害度分析、任务分析（或类似）故障树和事件树。

应当注意，还需要将人为错误与组织故障考虑在内，而风险影响图或贝叶斯信念网络正是合适的工具。

有一种替代方法是采取 Lotsberg et al.（2004）所使用的方法分析压载系统与稳性场景故障。

另一种替代方法是使用最临界场景的事件树，但通过故障树及相似方法来忽略对事故概率的量化。

这两种方法的不足之处在于识别可行改进措施的依据将会被大大削弱。对可行改进措施进行识别是风险分析的主要目标之一。这是应当采用所建议方法的最主要原因。

11.1.9 量化风险评估结果与经验事件的比较 Comparison of QRA Results with Experienced Events

如果我们限定仅考虑半潜式设施，上文提及的最后一次严重事故（即挪威事故）已过去 20 多年。因此，在将量化风险评估结果与事故统计进行比较时，没有任何依据可参考。

如果纵观挪威海域过去的 30 年，我们可以找出一起全损事故，即“亚历山

大·基尔兰德”号浮式住宿船倾覆。监管要求在上世纪 80 年代初进行了修改，这之后即认定该事故不属于当前标准下的典型风险水平事故。当前标准对天气条件有详细规定，即如果仅有一根支柱出现故障，则不应当将事件升级，如果天气条件超出该水平(一年的环境条件加上安全因素)，则会出现相似的情形。尽管如此，考虑意外事故统计所蕴含的意义也是比较有吸引力的。

根据挪威大陆架风险等级(RNNS)项目提供的数据(PSA，2006a)，可以计算出每年移动式海上设施的数量。1990～2005 年间的总数为 259 个。1976～1989 年间的总数粗略估计为 111 个。因此这 30 年间的总数为 370 个。

如果我们采用泊松分布方法，期望值为 1/370 每个年，每个年的全损频率为 $2.7 \cdot 10^{-3}$。如果考虑预测区间，则 95%的上限将为 $1.1 \cdot 10^{-2}$ 每个年。假设在一段时期内配员水平正常，则死亡事故率(FAR)值将超过 100!

正如上文所述，由于对破损稳性的要求越来越高，依照当今标准，全损频率可能会较低。但是根据现有知识，还无法得知具体低多少。另一方面，我们也没有理由假定现代海上设施频率会低出不止一个数量级。这说明故障频率不可能低于 $1.0 \cdot 10^{-4}$ 每个年。

11.1.10　结论 Observations

通常针对浮式设施开展的量化风险评估研究的不适用性体现在几个方面。当研究认为出现的风险水平无关紧要时，则在可用的数据中找不到形成结论的依据。

更糟糕的是，风险降低措施作为风险分析主要目标之一，研究并未给出将其识别出来的依据。应当采用基于故障树与事件树的方法来分析识别出来的临界场景。

11.2　锚泊系统故障 Anchoring System Failure

根据设施规范第 64 条的规定对在挪威大陆架上用于石油开采活动的锚泊

系统安全性进行监管，第 64 条规定，移动式离岸钻井平台上的锚泊系统应当符合挪威海事管理局（NMD）1987 年 9 月 4 日实施的针对移动式离岸钻井平台锚泊/定位系统的第 857 条规范。此外，对于带有生产装置的设施以及与其他设施相邻的设施，其锚泊系统也应当符合挪威海事管理局（NMD）1994 年 2 月 10 日实施的针对带有生产装置与设备的移动式离岸钻井平台的第 123 条规范。在这些设施上进行计算时，不应当将锚泊绞车的积极作业优势包括在内。

总体而言，挪威海事管理局（NMD）制定的规范要求环境行动的年概率应当为 10^{-2}，此外还约定了一组安全因素。挪威海事管理局（NMD）制定的两项规范之间的主要区别在于安全因素以及锚索损失有关要求不同。挪威海事管理局（NMD）第 857 条规范要求钻井平台应当在一条锚索损失时保持位置不变，而第 123 条规范则要求，如果钻井平台与另一设施相邻，应当在两条锚索同时出现故障时保持位置不变。

根据挪威海事管理局（NMD）的规定，钻机通常无需遵守挪威海事管理局（NMD）第 123 条规范。但是根据挪威石油安全管理局（PSA）规范的规定，如果钻井平台与另一设施相邻，则所有钻井平台均需要遵守第 123 条规范，无论是移动式或非移动式。因此，挪威海事管理局（NMD）规范与挪威石油安全管理局（PSA）规范之间的主要区别在于针对相邻平台（即浮式住宿船）所制定的要求不同。在挪威石油安全管理局（PSA）规范中，应当将其作为采油平台上的锚泊系统进行分析。从挪威石油安全管理局（PSA）的角度来看，所发生的事故已经证明需要制定这一要求。通常在暴风雨天气下，浮式住宿船与相邻平台的距离为 150m。而人们发现多起锚故障发生之后，浮式住宿船漂移的距离超过了 150m。

规范的作用在于避免发生事故，但是偶发事件仍频频发生。我们得出的主要结论是：规范中的要求是合理的，但业内必须进行相应改进，以满足这些要求。

11.2.1 涉及一条以上锚索的偶发事件 Incidents Involving More Than One Anchor Line

挪威一直在频繁探讨是否需要制定分析两条锚索损失情况的要求，同时也在讨论 ISO-DIS-19901-7 的引进问题。而经验已经证明，损失两条锚索的确是可能出现的情况，因此规范中应当继续制定针对这方面的要求。下文探讨的偶

发事件来自于 Næss et al.(2005)。

2000 年 6 月 13 日，在一场夏日暴风雨中，靠近北海 Snorre 油田的“彼得福特·海豚”号钻井平台经历了 3 次锚索故障。故障出现在锚钩环(CR 铰链)上。CR 铰链用于连接锚链与绳索之间的铰链。锚钩环由于疲劳与撕开断裂出现故障。当时锚钩环仅使用了两年时间。张力约为试验张力的三分之一。平台从其目标位置被动漂移了约 250～300m。钻井安然无恙。锚索穿越了多条输出管线，但是并未损坏。10min 内平均风速约为 20m/s，有效波高约为 8.5m。

2001 年 11 月 11 日，挪威海 Heidrun 油田的“跨洋远景”号钻井平台经历了走锚事件，两根锚走锚约 50m。该钻井平台使用重 12t 的锚。10 分钟内平均风速约为 21m/s，Heidrun 油田上测得的有效波高约为 13～14m(Haver and Vestbøstad, 2001)。

2002 年 12 月 24 日，北海 Grane 油田的“Scarabeo 6”号钻井平台经历了走锚事件。该钻井平台使用重 15t 的锚。形成的张力比试验张力高出约 50%。当导索孔中的锚链出现破裂时，事件恶化。计算显示，锚索在达到约 80%支持能力的时候将断裂。导索孔仅有 5 个孔洞，可以预料到铰链上会出现弯曲和破坏载荷降低。10min 内平均风速约为 22m/s，有效波高约为 9～9.5m。钻井安然无恙，而钻井隔水管则悬在海面上。

2004 年 12 月 14 日，挪威海 Haltenbanken 油田的“海洋前卫”号钻机发生了一起事故。具体情况参见第 4.19 节。

在这 4 起涉及一条以上锚索的事故中，1 起与制动器有关，1 起与锚索有关，1 起由土壤故障造成，1 起由土壤及锚链共同故障造成。制动器故障、锚链故障以及走锚是锚泊系统在暴风雨天气条件下的 3 种基本故障模式。下文将分别针对这 3 种故障模式提供偶发事件统计。

11.2.2　绞车链的释放
Release of Chains in Winches

比较各类偶发事件可以发现，带式制动器故障是导致偶发事件发生的常见原因。最常见原因是带式制动器调节错误和/或腐蚀以及磨损。在一起偶发事件中，制动器的实际支持能力不足理论支持能力的 16%。根据 Næss et al.(2005)，没有一起涉及不受控锚链释放的偶发事件与锚链张力超过理论支持能力有关。

图 11.6 规定了绞车出现故障时的操作模式。正如所预计的那样,大多数偶发事件发生于锚泊操作过程中。在此期间,绞车处于启动状态,而制动器处于关闭状态。因此,系统容易发生技术与操作错误。

使用中最常见的根本原因是带式制动器发生故障和缺少维护。其他原因包括人为误操作、未遵守供应商说明以及程序错误。

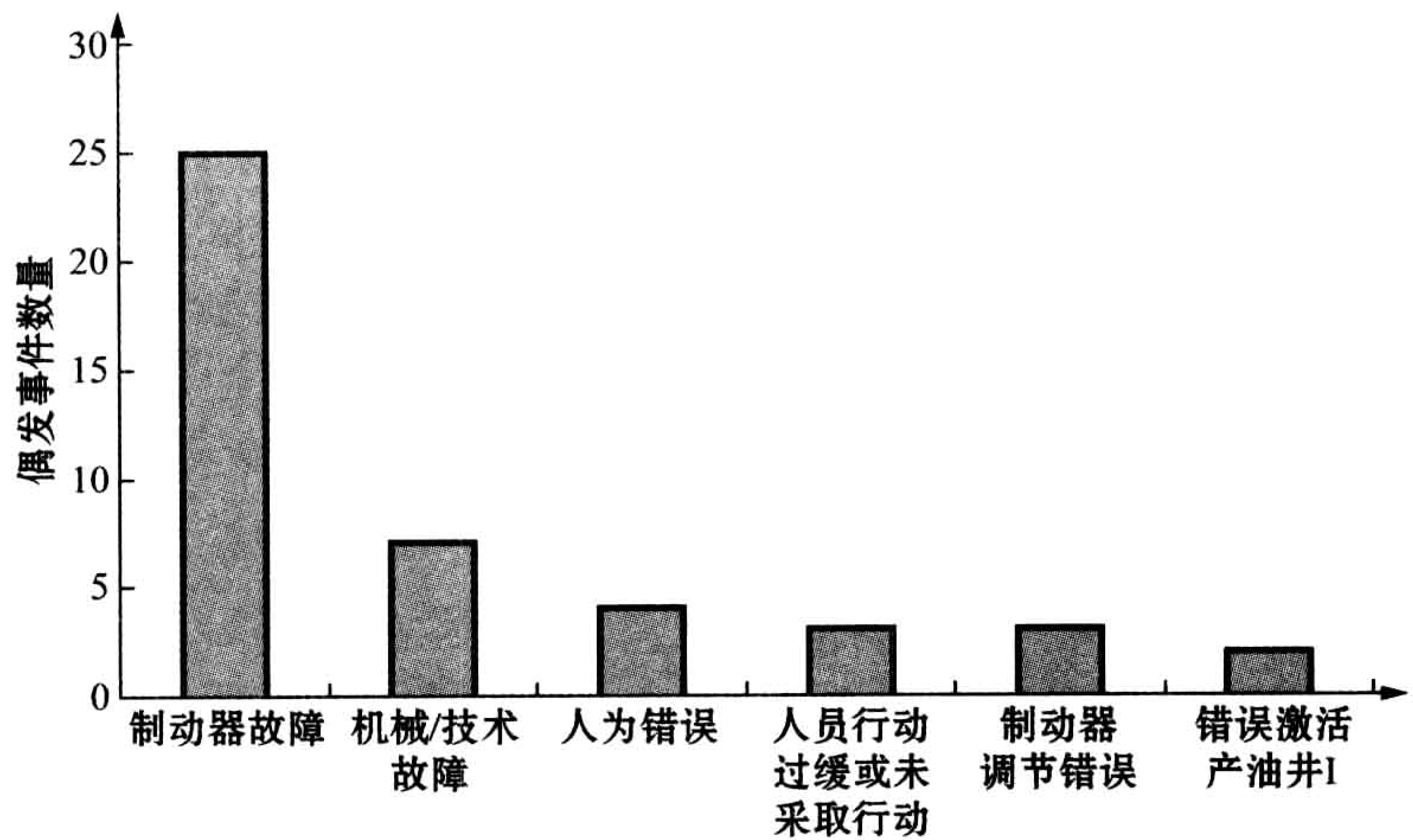


图 11.6　由绞车造成的锚索损失数量(根据错误类型分类)

11.2.3　锚索失效 Failures in Anchor Lines

1996～2005 年间,挪威大陆架上有 10 起锚索故障事故被上报给了挪威石油安全管理局(PSA)。根据 Næss et al.(2005),其中 5 起事故由锚链故障造成,2 起由损失纤维缆绳造成,另外 3 起由锚钩环故障造成。

锚钩环用于连接管线各段。英国经验证明,锚钩环发生故障的频率要比锚链自身元件发生故障的频率高出许多(Noble Denton, 002)。挪威经验在这方面同英国类似。2 起事故(CR 铰链)均由疲劳故障引起。连接局部应力导致出现疲劳裂缝。材料冲击韧性不符合要求。在其中一起事故中,由于无法将锚钩环从海床上拉起,因此无从确定故障发生原因。

即使回顾至 1990 年的历史数据,也没有发现锚泊系统中正在使用的绳索

出现故障的报道。因此不再将绳索考虑在内。

劣质锚链是导致锚链故障发生的最常见原因。这是指锚链出现脆性断裂与疲劳。部分锚链受到了弯曲载荷的影响,但是腐蚀与螺栓松动才是造成故障的原因。弯曲现象很可能会出现在五英寸的导索孔上。

过去 3 年里,发生过 3 起由纤维缆绳造成的故障。纤维缆绳不如锚链那样能够抗机械作用。在挪威,纤维缆绳通常结合了锚链与绳索,以避免管线受损。近年来有大约 20 根纤维绳索用在挪威大陆架上。这 3 起故障的原因分别为:从捕鱼船通向拖网板的缆绳发生故障,通向遥控机器人(ROV)的缆绳发生故障,以及与吊钩连接的缆绳发生故障。

浮标用于连接锚索,以使锚索高于海底障碍物。1996～2005 年间,上报给挪威石油安全管理局(PSA)的浮标损失案例仅有 2 起。事件数量如此之少,很可能是由于没有完全上报,因为尚未制定明确的规定要求必须上报此类事件。

11.2.4 走锚 Dragging of Anchors

这一时期在挪威报道过 4 起锚的支持能力受损的案例。这些事件均发生在恶劣天气条件下。1996～2003 年间,英国出现有关暴风雨天气条件下走锚事件的报道(HSE, 2005b; Næss et al., 2005)。

当锚没有被牢牢固定在海底时,将发生走锚故障。通常有必要开展土壤调查以精确计算土壤能力。对于勘探钻井而言,人们已经明确要利用该区域土壤条件的基本信息。通常会采用 150～200t 的试验张力。试验张力限定何时平台可以与钻井相连或与另一平台相邻而进行作业。大部分试验张力用于克服海床上的锚链摩擦力。走锚故障证明,150～200t 的试验张力不足以避免走锚故障的发生。

走锚并不属于事故,但是会造成锚索张力意外再次分布,从而导致其他锚索发生故障,并造成意外失位。

11.2.5 锚泊系统的其他风险 Other Risks with Anchoring Systems

处理锚的操作人员处于高风险之中。1996 年 Maersk Terrier 号与 Far

Minara 号、2000 年 Maersk Seeker 号以及 2001 年 Viking Queen 号锚处理船均发生过死亡事故。此外，平台和船上的锚泊系统出现设备受损事件以及海底管线上的锚泊系统出现设备受损事件也有过报道。本文不对这些风险进行论述。

11.2.6 挪威大陆架移动式离岸钻井平台上锚泊系统的风险分析 Risk Analysis of Anchoring Systems on MODUs on the NCS

1998～2003 年间，在挪威大陆架与英国大陆架(HSE，2005b)上发生的锚泊系统故障数量几乎一样，这说明挪威上报故障频率较高，因为英国海域中移动式离岸钻井平台的数量更多一些。挪威上报数据中的走锚事件数量高出尤其多。

为了分析锚泊系统，我们回顾了针对 6 个移动式离岸钻井平台、一艘浮式住宿船以及 3 个生产平台开展的量化风险评估。大多数量化风险评估中，对“失位”事件的分析非常粗略，也没有识别出可造成失位的若干危险。仅有一项量化风险评估将绞车故障认定为危险。大多数量化风险评估未提及的其他危险包括浮标损失、疲劳、捕鱼船与绳索相连以及走锚。部分分析没有对方法以及适用的数据进行详细记录。仅有 3 项分析对假定进行了规定。不同数据源的使用使得相似系统的风险水平计算差异很大。分析中未使用故障树。

11.2.7 锚泊系统量化风险评估中的故障树应用 Use of Fault Trees in QRA of Anchoring Systems

故障树用于分析积极作业条件以及暴风雨条件下的故障、锚索故障(锚链或绳索)以及走锚故障。用于分析暴风雨天气下制动器故障、锚链故障以及走锚故障的通用故障树参见 Kvitrud et al. (2006)。在海上作业过程中松开锚链的故障树参见 Næss et al. (2005)。通过危险识别和回顾挪威可用出版物中涉及的事件原因来建立通用故障树。根据挪威事件数据计算频率。通用故障树会给出导致顶事件发生的原因。

11.2.8　总结
Summary

挪威大陆架移动式离岸钻井平台上锚泊系统偶发事件的发生数量较高。建议对培训与组织因素多加重视。如果行业内建立了一个良好的经验交流体制,并且全体船员对锚泊系统及其功能有充分的了解,许多偶发事件可能根本不会发生。此外,还应当对维护多加重视。

许多偶发事件的发生与临界作业有关。设备与钻井相连,或与另一设备相邻。尽管锚泊系统设计可应对锚索故障,但这仍然是人们不期望发生的事件。

根据规范,在任何时候都应使用两个独立的制动器系统。只有当两个制动器系统均出现故障时才可能发生偶发事件。如果绞车满足规范要求,就不可能发生这些偶发事件。每个独立制动器系统发生故障的频率无从确定。但是两个制动器系统均发生故障并引起绞车链调度的事件数量表明,故障率还是比较高的。

锚索故障本身是最常见的一种锚泊系统故障。检验与维修可重新证明锚链质量可靠,而其质量与数量最为重要。使用年限超过 20 年的锚链仍在使用中。因此,为重新证明锚链质量可靠而进行的检验与维修对于确保锚链满足适用锚索质量要求至关重要。锚链所有人必须了解每一条锚索的来龙去脉(可追踪性),以便确保能够成功地重新证明锚链质量可靠。近来在锚链上发生过多起由弯曲应力造成的疲劳故障。我们有理由假定弯曲应力也发生在导索孔上。

锚钩环故障数量与锚链故障数量几乎相同,且这两种故障会导致相同的后果。相比链节数量,锚钩环数量较少,因此每一个锚钩环发生故障的频率均比链节发生故障的频率要高出许多。应当特别注意对锚钩环的选择以及对锚钩环状况的评估。

某些情况下,在锚索上使用纤维缆绳对于安全性与操作性来说是有利的。另一方面,纤维缆绳已被证明无法应对机械作用,例如当与绳索连接在一起时。由于纤维很脆弱,因此必须更加严密监控在锚纹内进行的活动。

走锚事件发生的数量说明,的确需要提高预张能力或使用其他锚解决方案。在现有试验张力下,可能无法利用传统爪锚实现安全锚泊。必须比目前惯例更加精确地确定移动式钻井平台上锚的支持能力。对于利用移动式平台钻

探勘探油井而言,有限的走锚并不一定会导致严重后果。另一方面,经验已证明,走锚可导致相邻锚索发生故障。通常人们利用众多水下设备将钻井平台固定在某个区域。而走锚可能损坏这些海上设施。因此需要提高移动式平台上锚的试验张力。即使对土壤情况了如指掌,也可能很难利用传统锚(浮锚)制定出一项合适的地基解决方案。因此应当对其他类型的锚泊系统进行评估。只有在对其他锚索中的张力以及可能对海底设备和相邻平台造成的损害进行后果进行评估后,才可接受走锚。

锚泊分析结果应当与设备上实际锚泊作业结果一致。如果锚泊分析仅仅是一项学术活动,它就不会对安全性有所提高。

定量风险分析是发现并量化风险降低措施的一种常用方法。在已经审核过的量化风险分析(QRA)中,还没有对锚系统与锚作业进行详细分析。没有对若干故障模式进行识别或分析,也没有将这些分析作为降低风险的基础。总体而言,这些量化风险评估对于实现目标作用甚微。

11.3 钻探动力定位系统失效 Failure of Drilling DP Systems

屏障方法曾用于分析在挪威大陆架上开展的动力定位钻探作业的安全性(Scandpower 风险管理,2005a)。图 11.7 是此类钻探作业的一张图示。

基于动力定位钻探作业中发生的临界故障事件,该项研究对 3 种屏障功能进行了建模:

- 屏障功能 1:预防失位;
- 屏障功能 2:阻止船舶移动;
- 屏障功能 3:预防油气井完整性损失。

图 11.8 是一个与横向偏移界限与临界故障事件相关的屏障功能图示。这是在动力定位钻探作业研究中开发出的一个整体安全模型。

通过分析这 3 种屏障功能(通过对涉及的屏障元素和相关技术、人为和组

织因素的系统识别和分析），可以分析出动力定位钻探作业的安全性，并使之有效提高。

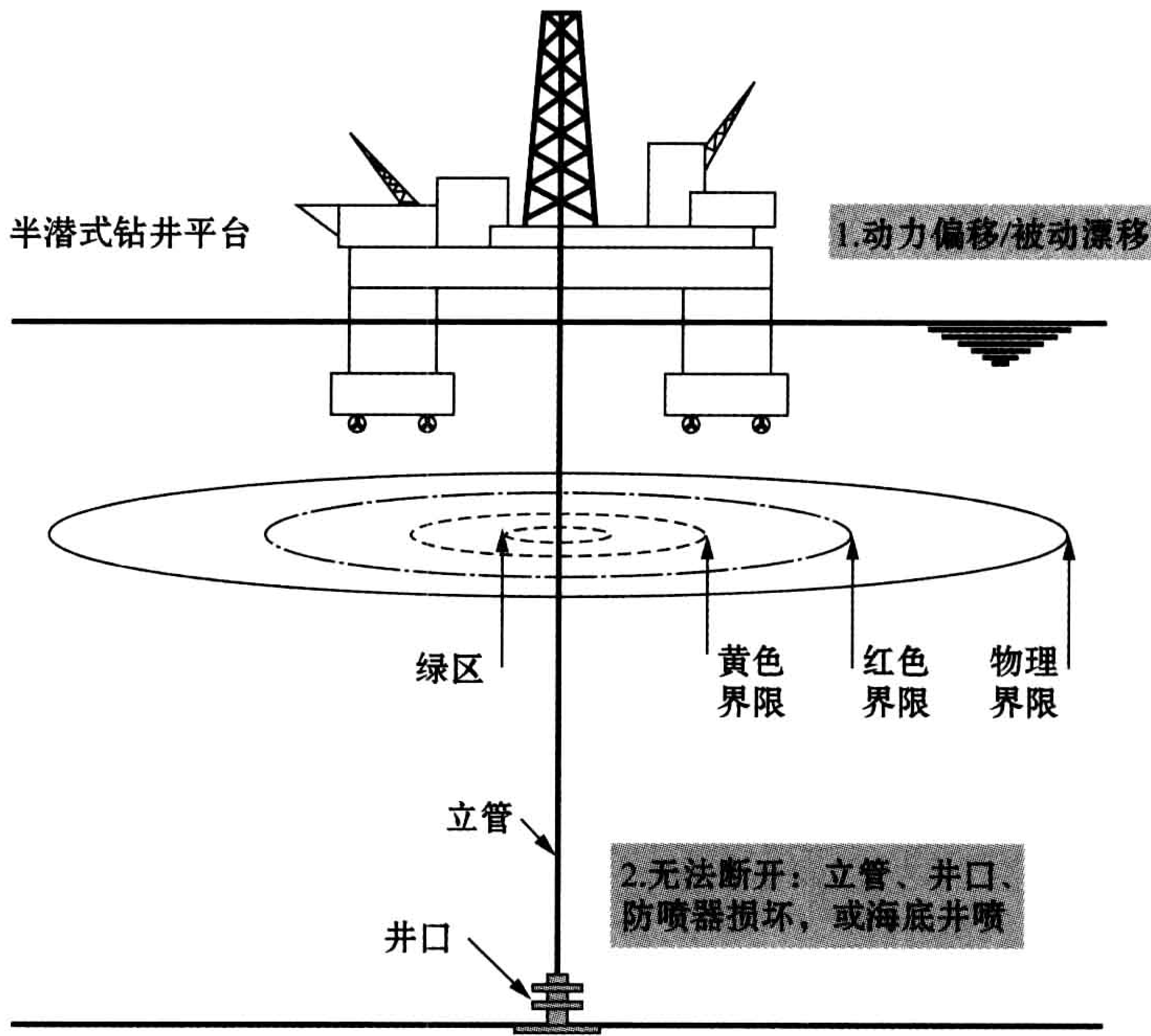


图 11.7　动力定位钻探作业（界限：不衡量黄色、红色、物理界限）（Chen，2006）

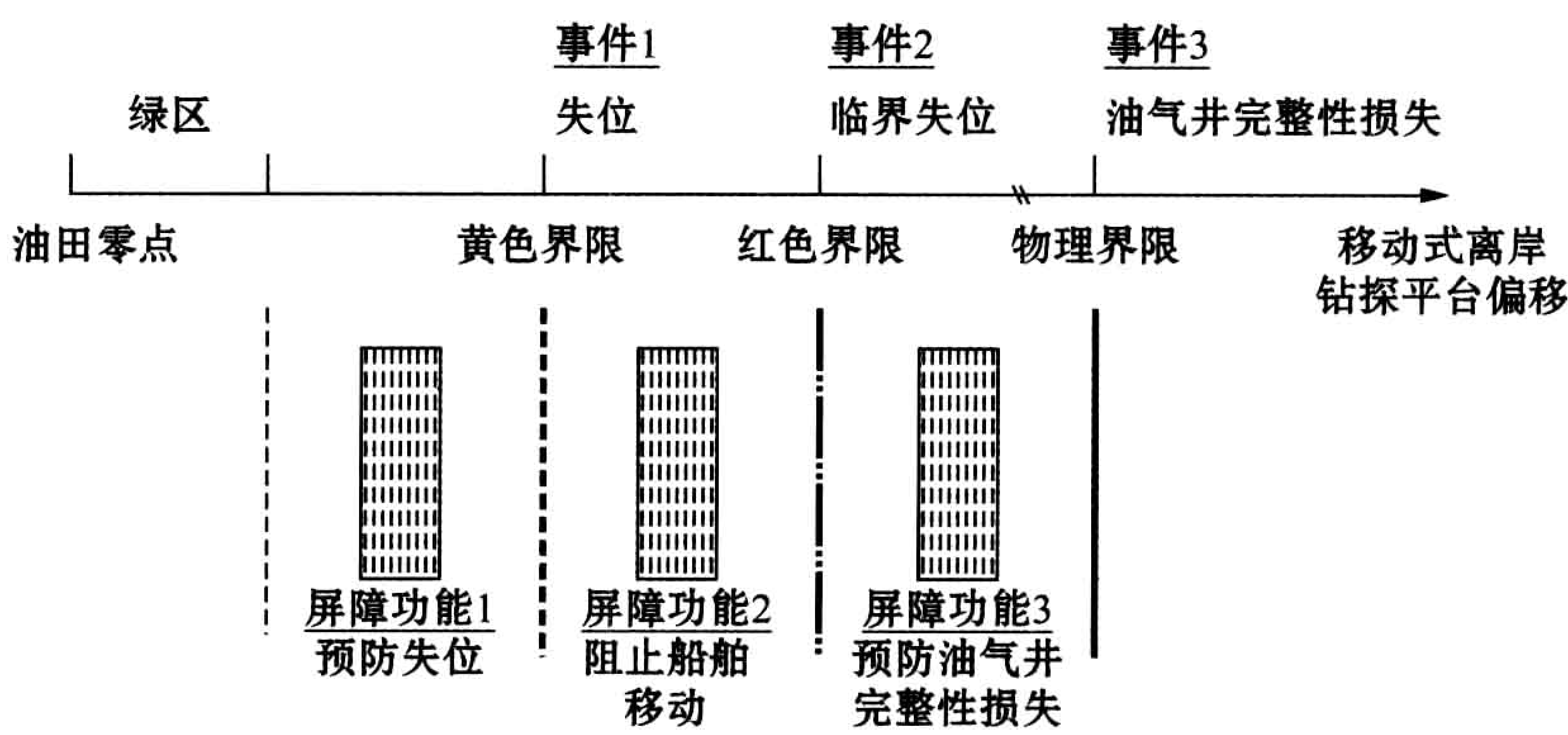


图 11.8　保护动力定位钻探作业的 3 种屏障功能（Chen，2006）

11.3.1 屏障功能1：预防失位 Barrier Function 1—Prevent Loss of Position

针对对于动力定位钻探作业而言处在临界状态的动力偏移场景进行屏障建模与分析。由于两个差分全球定位系统(DGPS)钻井平台给出的错误位置数据，因此动力定位控制系统导致动力偏移(Chen and Moan，2005)。已经识别出那些可防止差分全球定位系统生成错误位置数据和防止动力定位软件使用错误差分全球定位系统位置数据的屏障元素。同时，根据挪威大陆架上发生的偶发事件与作业经验，这些屏障元素之间的关联性也得以揭示。推荐使用的风险降低措施包括以下行动：

- 对两个差分全球定位系统之间缺乏独立性进行纠正；
- 对船上的全球定位系统以及差分连接天线位置进行评估与验证；
- 对差分全球定位系统的质量控制功能进行软件配置；
- 如果可行，根据3种不同的原理充分利用位置参考系统；
- 对差分全球定位系统的输入验证功能和位置参考错误测试功能进行软件设计、测试并配置。

这些推荐措施将与挪威大陆架上作业的多家石油公司的动力定位要求文件的修订工作结合在一起，这其中就包括挪威国家石油公司(Statoil)公司。此外，Chen、Moan与Verhoeven已发表了两篇论文对研究工作进行总结(2006a与b)。

11.3.2 屏障功能2：阻止船舶移动 Barrier Function 2—Arrest Vessel Movement

必须采取有效措施阻止船舶移动，以预防失位升级为临界失位。动力定位操作人员被视为与本屏障功能相关的唯一屏障元素。大量可严重影响动力定位操作人员在时间临界动力偏移场景中做出反应的缺陷也已被识别出来。这些缺陷被认为与以下4个影响因素类别有关，即船桥人体工程学、报警系统、程序以及培训。可通过以下措施实现风险降低：

- 在图像显示装置上设计船桥布局、动力定位操作人员工作站以及信息呈现；
- 对报警系统的报警发出、报警接收、报警分析、报警处理以及报警原理进行设计；
- 针对动力定位操作人员在可能发生的应急场景中探测偏差、处理位置参考系统故障并执行多种矫正任务制定程序；
- 针对动力定位钻井平台上动力定位操作人员制定总体培训方案，并根据实际和/或假定的最严重动力定位事件进行动力定位模拟器培训。

将由每一位船东的作业管理团队执行这些推荐措施。在其中两个方面，即船桥设计与动力定位钻探平台动力定位报警系统评估方面，还需要石油公司、船东、船级社、设备厂家和培训机构共同努力，以系统加强人为屏障元素。

11.3.3　屏障功能 3：预防油气井完整性损失 Barrier Function 3—Prevent Loss of Well Integrity

假设出现临界失位，应急断开故障可能导致油气井完整性损失，即油气井中出现裸井现象。已识别出 3 种屏障元素，以预防油气井完整性损失。它们分别是应急快速断开系统（EQD）、安全断开系统（SDS）以及油气井闭井功能。推荐以下措施：

- 制定与应急断开相关的系统技术完整性方案，以便在根据需要将故障损失降到最低；
- 如果可行，在浅水区使用自动应急快速断开系统与安全断开系统进行钻探；
- 指派合格的动力定位操作人员对情况进行评价并在需要时及时启动红色状态，此外，作业管理团队还应当支持动力定位操作人员所做出的决定；
- 涉及动力定位操作人员和钻探人员的船上钻井装置，以手动启动应急快速断开系统；
- 在防喷器中有不可剪切的物品时，采取特殊作业预防措施。

11.4 穿梭油船碰撞风险 Shuttle Tanker Collision Risk

根据1995～2003年间发生的偶发事件与事故对卸载过程中由穿梭油船冲击造成碰撞风险所开展的评估是一项相对较为粗略的评估。目前已经完成了对穿梭油船碰撞风险的大概论述与评估。该评估仅针对利用动力定位系统操作的穿梭油船，而不考虑利用张紧式锚链操作的油船。对动力定位1油船与动力定位2油船的碰撞频率有所介绍，其中考虑到了发生频率趋势。

11.4.1 背景 Background

自1986年以来，利用转动架系泊的单壳浮式生产储卸装置以及浮式储油平台已经在西北欧水域使用[Petrojarl I]，迄今为止尚未发生过任何严重的人员或环境事故。在过去的5～10年中，越来越多的这种针对油田开发的船舶在英国与挪威海域以及其他众多离岸区域中使用。

浮式生产储卸装置并不是一种新型石油开采平台，它们已经在世界上其他一些地方使用了一段时期，而且与现在的北海船队相比其数量还相当多。根据《离岸》杂志(2005年8月)报道，2005年7月，在英国与挪威海域服役的浮式生产储卸装置/浮式储油平台刚超过20艘，在世界上其他区域服役的约有110艘，正在建造或改装的刚超过10艘。

这种船舶安装在平静海域中，通常已被改装为可在船头系泊和输送流体的货轮，有时也用装油浮筒改装。

与安装在更加平静海域的船舶相比，安装在北海、北大西洋以及挪威海油田中的船舶遵照传统设计可适应极高的环境载荷，通常也可适应较高的生产量。毫无例外，这些海域目前已经安装或正在建造中的船舶也有“内部”转动架，位于船头或船中央的前部，并通过转动架上的管道系统运输增压采出液流与喷嘴射流。

尽管浮式生产储卸装置正变得越来越普遍，但是其作业安全性能仍然未得

到证实，尤其当与海上固定设施进行比较时。海上浮式设施更依赖在正常作业中以及临界状况下对部分船用系统进行手动控制。因此需要了解浮式生产储卸装置的作业安全性，以便采取积极的方法保证安全，尤其在以下方面：

- 转动架作业与挠性立管；
- 同时进行的海上活动与采油活动；
- 船舶移动/暴露天气条件；
- 采油、压载与卸载。

由人为和组织因素、技术（设计）故障或这些因素的总和造成的错误通常是事故的发生原因。因此，有效预防或减轻潜在操作事故影响的方法极为重要。在此，我们将范围限定在将货船从固定船舶上卸载下来的过程（包括接近、连接与断开阶段），对穿梭油船和浮式生产储卸装置/浮式储油平台之间的碰撞风险进行评估。

在 1996～2000 年的 4 年半时间里，发生过 5 起事故，部分采用浮式生产储卸装置概念的项目中发生的危险也受到了极大的关注。

在 1996～2003 年间开展了一项关于“浮式生产储卸装置作业安全性”的研发项目（Vinnem et al.，2000；Vinnem，et al.，2002；Vinnem et al.，2003c）。该项目属于联合工业项目，由挪威国家石油公司、埃克森公司和健康与安全管理局（HSE）提供资金支持，纳维昂公司提供技术支持。

在 2000～2003 年间，该项目对在串列卸载配置过程中穿梭油船和浮式生产储卸装置/浮式储油平台之间的碰撞风险进行了详细评估。关于该项目得出的大体经验被记录在健康与安全管理局（HSE）的《浮式生产储卸装置作业安全性、穿梭油船碰撞风险及总结报告》中（Vinnem，2003）。报告中的评估基本上基于该项目。

在开展该联合工业项目的同时，还进行了一项内容相同的博士研究（Chen，2002）。陈海波工学博士的工作也是当前评估基础的一部分。评估将全卸载系统考虑在内（参见图 11.9），包括：

- 在各个卸载阶段中使用的浮式生产储卸装置；
- 卸载布置；
- 在各个卸载阶段中使用的穿梭油船。

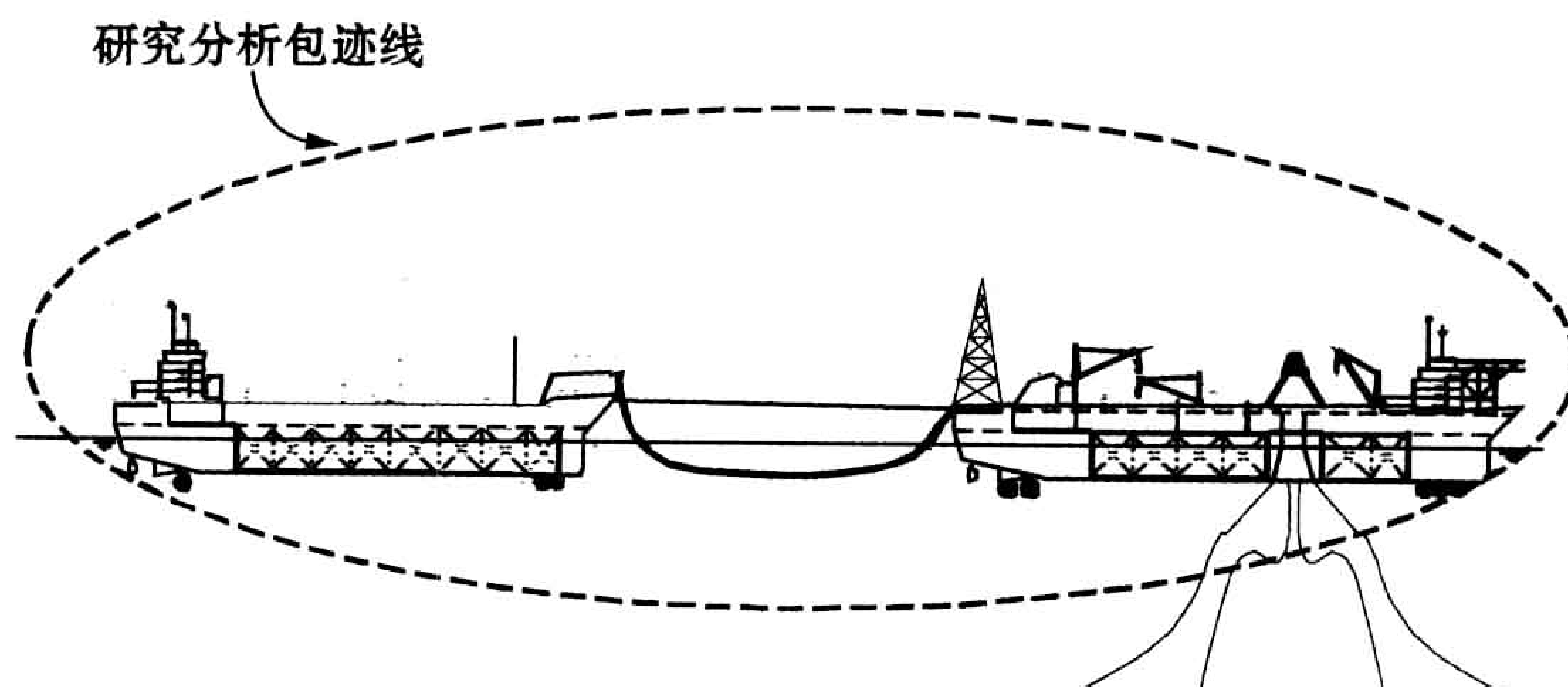


图 11.9　分析包迹线

评估中涉及的作业内容(人为和组织因素)适用于整个分析包迹线范围内的组织。这说明浮式生产储卸装置组织和穿梭油船组织在各个卸载阶段均处于分析范围内。评估仅限于以下方面：

- 评估适用于利用动力定位系统操作的穿梭油船，而不适用于利用“张紧式锚链”控制两艘船舶之间距离的油田配置(参见第 11.4.3 节与第 11.4.9节的详细论述)；
- 仅考虑串列卸载配置；
- 不考虑 1995 年以前的作业；
- 该评估仅为一项粗略的风险评估，因此没有使用涉及油田具体配置与特性的详细评估方法；
- 卸载阶段已被证明是主要风险源，因此没有将其他阶段(接近、连接与断开)明确考虑在内。

11.4.2　串列卸载配置 Tandem Off-loading Configurations

此处仅针对从浮式生产储卸装置系统和浮式储油平台系统上卸载这一过程进行论述。假设对卸载系统配置，使得浮式生产储卸装置/浮式储油平台和穿梭油船之间的距离较为接近，处于 40～150m 范围内(理论上)。(还未出现过距离超过 110m 的情况。)

本章节重点关注对碰撞危险而言具有重要意义的方面，其他一些方面并未

包括在此粗略评估中，但是将在一项更详细的评估中进行论述。

串列卸载系统的一项独特之处在于将特制系统与市售系统结合在一起。因此适用于可比较情况的配置之间差异比较大。

浮式生产储卸装置可称为“特制”。当为一个特定油田新建一艘浮式生产储卸装置时，可以对其度身定制以满足各项需求与要求。将商业油船改装为浮式生产储卸装置通常是那些环境条件较佳、且卸载过程中遇到的困难较少区域的首选。

然而，北海和那些环境条件恶劣、且必须采用复杂卸载串列模式的区域也采取了这种改装方式。这说明各种系统配置之间的差异很大。

穿梭油船从浮式生产储卸装置/浮式储油平台上卸载在很大程度上与从固定设施（即固定、浮式或海底浮标系统）上卸载相同。通常这些油船不仅仅用于开展一种作业，从油船的能力能够看出油船适合开展何种作业。表 11.1 列出了可能存在的一些差异，它们与对于避免穿梭油船和浮式生产储卸装置碰撞非常重要的某些方面有关。

11.4.3　当前油田配置的概述 Overview of Current Field Configurations

如果将碰撞频率的最重要方面考虑在内，则会发现不同油田配置之间的差异很大。部分差异如下。

表 11.1　浮式生产储油泄油船/浮式储油单元油田配置差异

特　性	差　异
浮式生产储卸装置定位保持能力	带有 8～12 点系泊系统的内部转动架
浮式生产储卸装置艏向保持能力	无艏向控制 有艏向控制
穿梭油船艏向与定位保持能力	无推进 主推进（单螺旋或双螺旋） 无动力定位系统 动力定位 1、动力定位 2 或动力定位 3 系统
卸载模式	利用动力定位系统作业 利用张紧式锚链作业

（续表）

特　性	差　异
界面系统	有锚链连接 无锚链连接
浮式生产储卸装置和穿梭油船之间的距离	50～100m 80m 150m(仅为提议，目前并未采用)

图 11.10 显示英国与挪威海域中基于动力定位系统的卸载、张紧式锚链以及其他卸载模式分布。

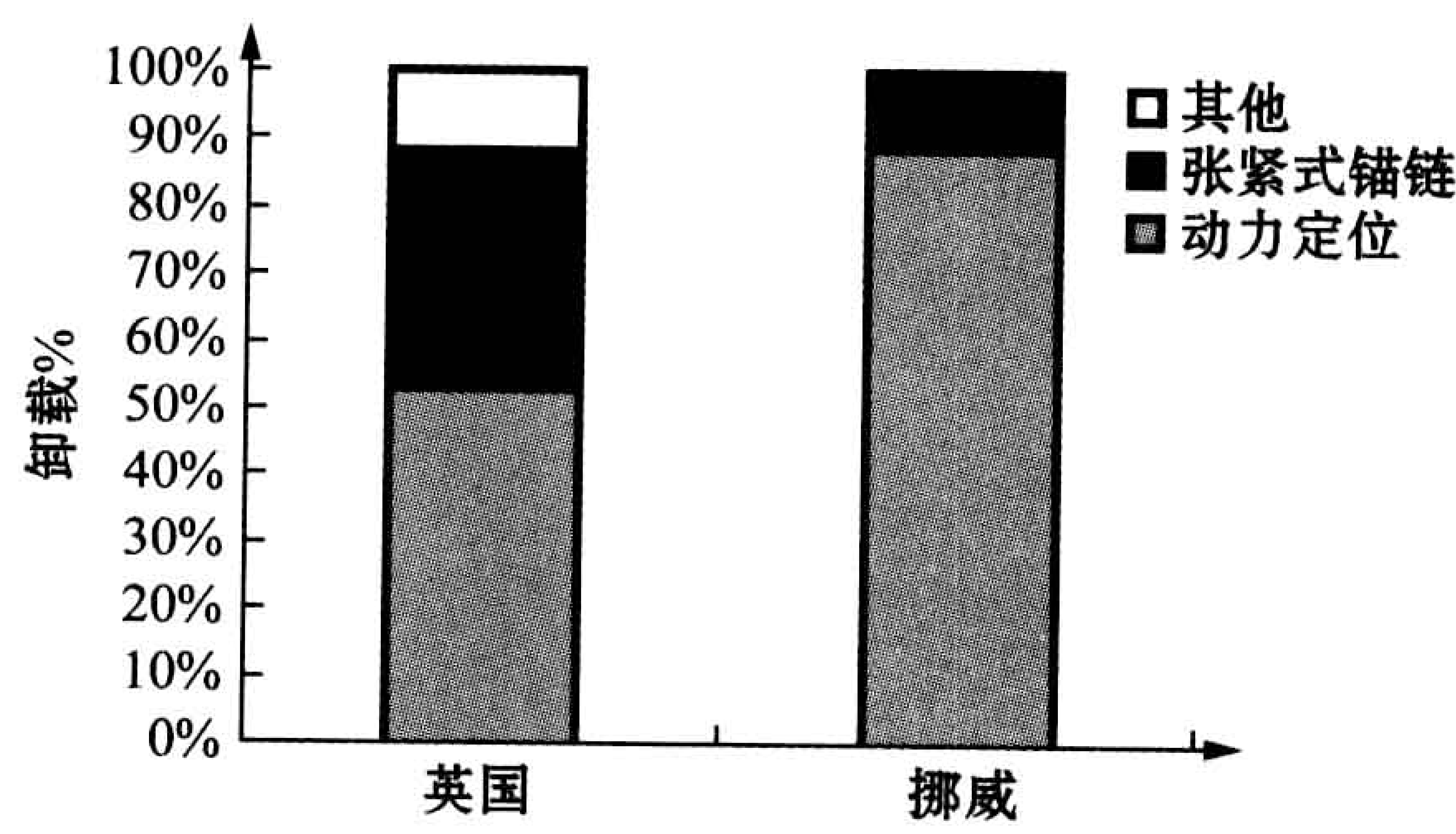


图 11.10　英国与挪威卸载模式一览

可以看出，基于动力定位系统的卸载在挪威海域中较多(约为 90%)，而在英国海域中仅略高于 50%。

图 11.11 显示英国与挪威海域中船舶之间卸载距离的分布，该分布仅针对利用动力定位系统开展卸载作业的油田，因此不包括利用张紧式锚链、管线或浮标开展卸载作业的油田。

值得一提的是，英国油田的距离范围在 50m 到 75～80m 之间，而挪威油田的距离范围在 75～80m 到 100～110m 之间。

浮式生产储卸装置和浮式储油平台上推进器能力的可用范围也进行了评估。评估显示，挪威油田有安装更多推进器动力的趋势，但是这一差异不如图 11.11 中的距离差异那么明显。

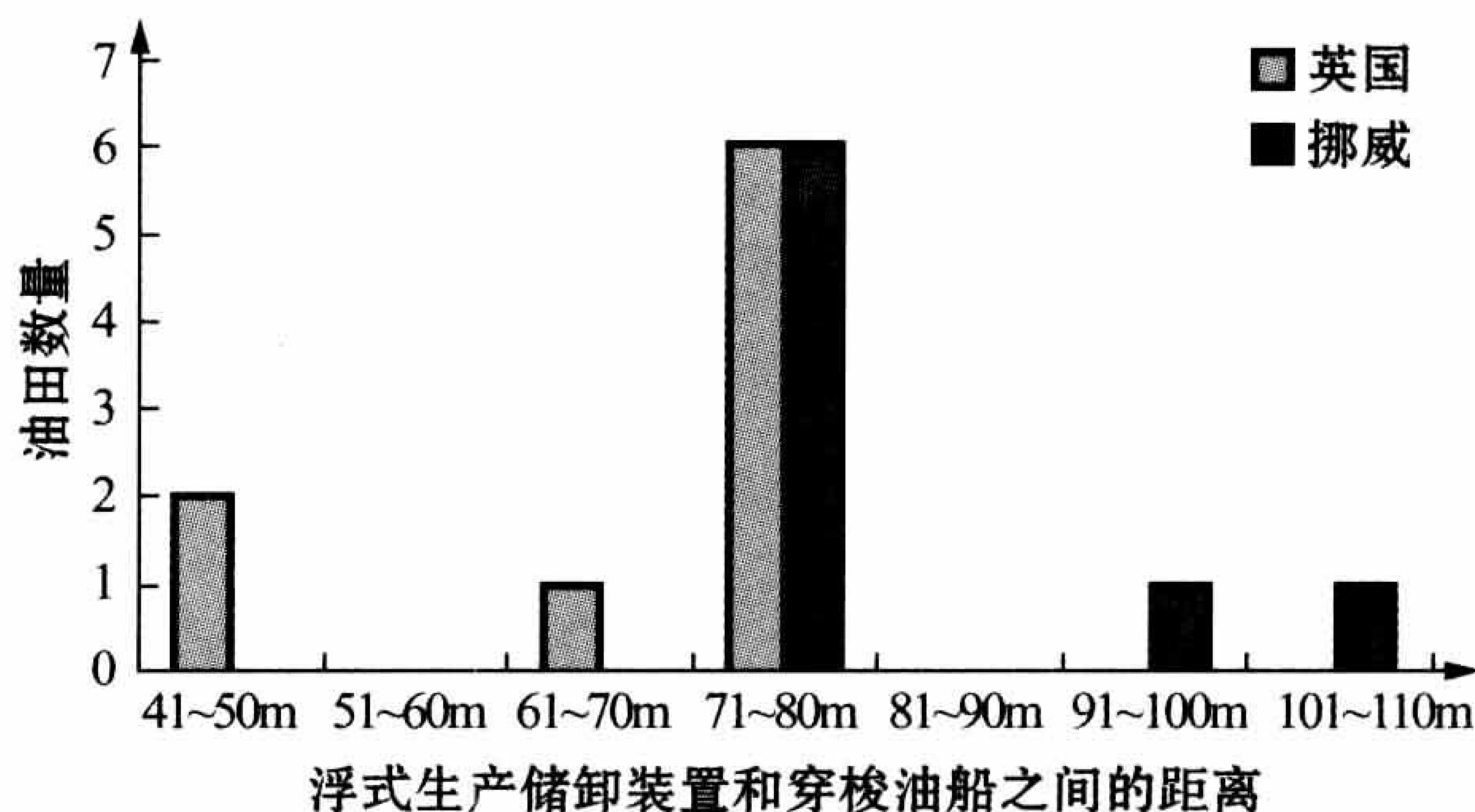


图 11.11　浮式生产储卸装置和穿梭油船之间的卸载距离一览

11.4.4　穿梭油船碰撞危险的特征描述 Characterization of Shuttle Tanker Collision Hazard

人们通常将浮式生产储卸装置和穿梭油船之间的碰撞危险视为仅关于穿梭油船技术与作业能力的函数。根据 Vinnem(2003),这种观点实在是过于简单。实际串列卸载中的碰撞故障模型可包括以下两个阶段：

- 初始阶段:穿梭油船处于向前的动力偏移位置；
- 矫正阶段:矫正行动未能避免碰撞发生。

该模型适用于因穿梭油船动力偏移造成的碰撞,根据 Vinnem(2003),迄今为止这一直是最重要的一种碰撞机制。串列卸载中,人们认为出现穿梭油船向前被动漂移场景概率较低,且后果较轻。已定义两个参数以表明这两个阶段的特征：

- 动力偏移阻力—在初始阶段；
- 矫正强度—在矫正阶段。

这两个参数用于识别浮式生产储卸装置和穿梭油船油田配置的必要要求,这些要求要尽可能有利,以便最小化或降低人为和组织因素对碰撞概率的影响。

动力偏移阻力指与控制浮式生产储卸装置和穿梭油船移动相关的多种因素，如下所示：

- 穿梭油船：
  - ○ 定位系统（包括动力定位、位置参考系统、船舶感应器、主 CPP、推进器以及相关推进系统）；
  - ○ 动力定位操作人员。
- 浮式生产储卸装置：
  - ○ 定位系统（除转动架系泊外，还包括可能的动力定位系统、推进器、主推进系统、舵）；
  - ○ 定位操作人员。

矫正强度指穿梭油船在动力偏移情况下成功启动矫正的能力，以避免碰撞。还应注意，在动力偏移情况下必须由穿梭油船动力定位操作人员启动并执行矫正行动。

矫正过程中存在极大的时间压力，因为可能仅需要 120sec 的时间，穿梭油船就会在全速前进动力偏移情况下和浮式生产储油泄油船船艉相撞。所以必须尽早启动矫正行动，以成功避免碰撞。

因此，需要从人为行动时间角度确定矫正强度，即明确何种因素会影响有效时间（时间窗）及何种因素会影响启动行动所需时间。如果时间窗较长和/或启动矫正行动所需时间较短，则矫正强度（由穿梭油船动力定位操作人员确定）较高。

- 影响有效时间（时间窗）的因素：
  - ○ 浮式生产储卸装置和穿梭油船之间的距离；
  - ○ 穿梭油船的动力定位等级与主推进能力；
  - ○ 作业阶段。
- 影响启动行动所需时间的因素：
  - ○ 报警设计与设置；
  - ○ 工作态度与注意力集中程度；
  - ○ 操作人员从培训与作业经验中具备的能力。

该方法的简化版将以下方面考虑在内：

- 阻止动力阻力：浮式生产储卸装置和穿梭油船定位/艏向保持能力：
  - 大范围推进器系统（浮式生产储油泄油船）；
  - 动力定位 2 等级油船。
- 矫正强度：浮式生产储油泄油船和穿梭油船之间的距离。

图 11.12 为矫正强度原理简化图，当前北海中采用的理念体现在这张图中。

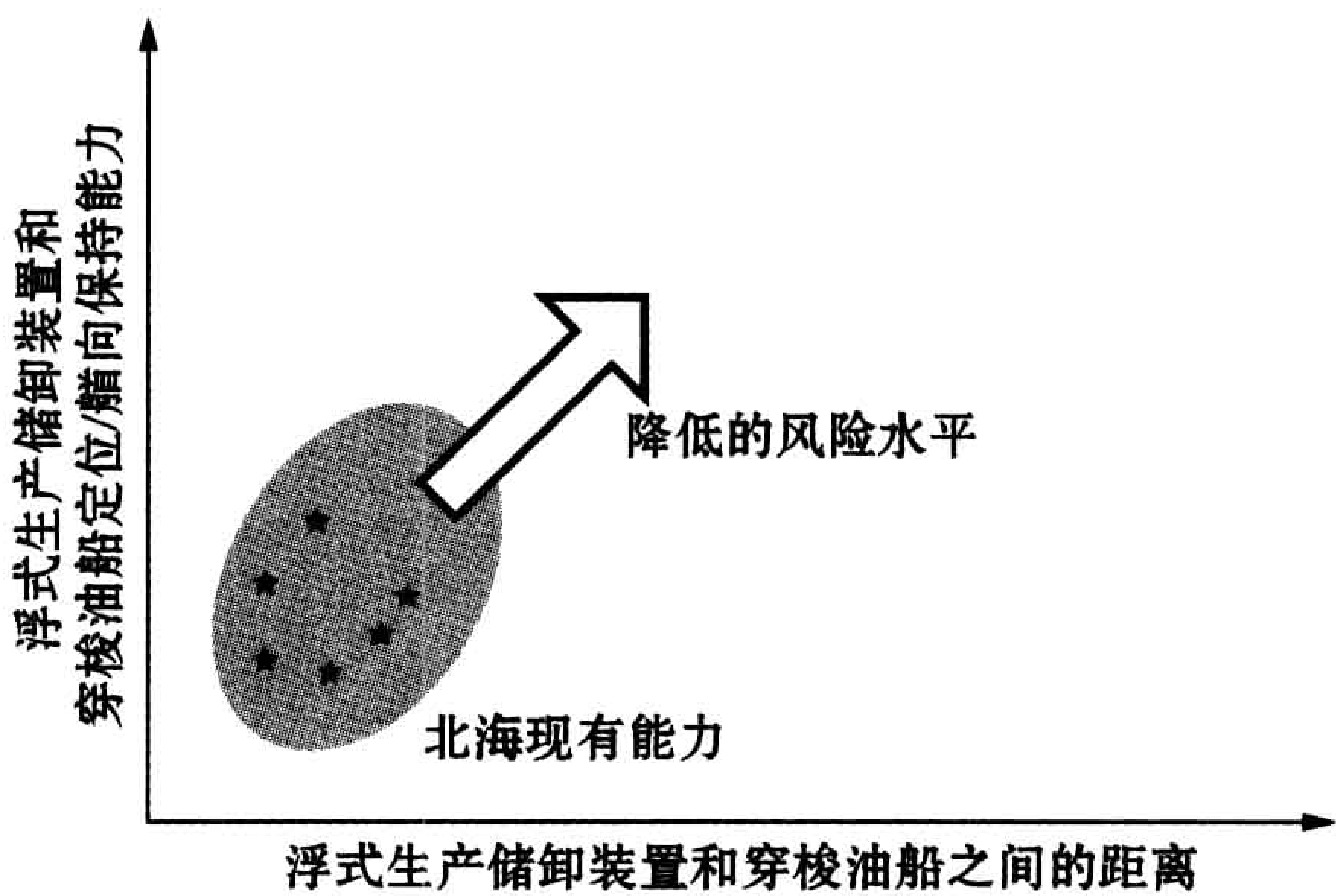


图 11.12　动力偏移阻力与矫正强度简化图

11.4.5　屏障建模 Barrier Modelling

图 11.13 为一个动力偏移碰撞危险屏障模型。该模型指出，一旦出现异常前进移动，动力定位操作人员则是唯一能够执行必要矫正屏障功能的屏障元素。其成功与否取决于众多技术、操作与个人因素，但是动力定位操作人员采取的行动必须是正确且及时的。

已经在浮式生产储卸装置作业安全研发项目中识别并构造出了可保证动力定位操作人员成功避免碰撞的风险降低因素（RIF），参见 Vinnem(2003)。

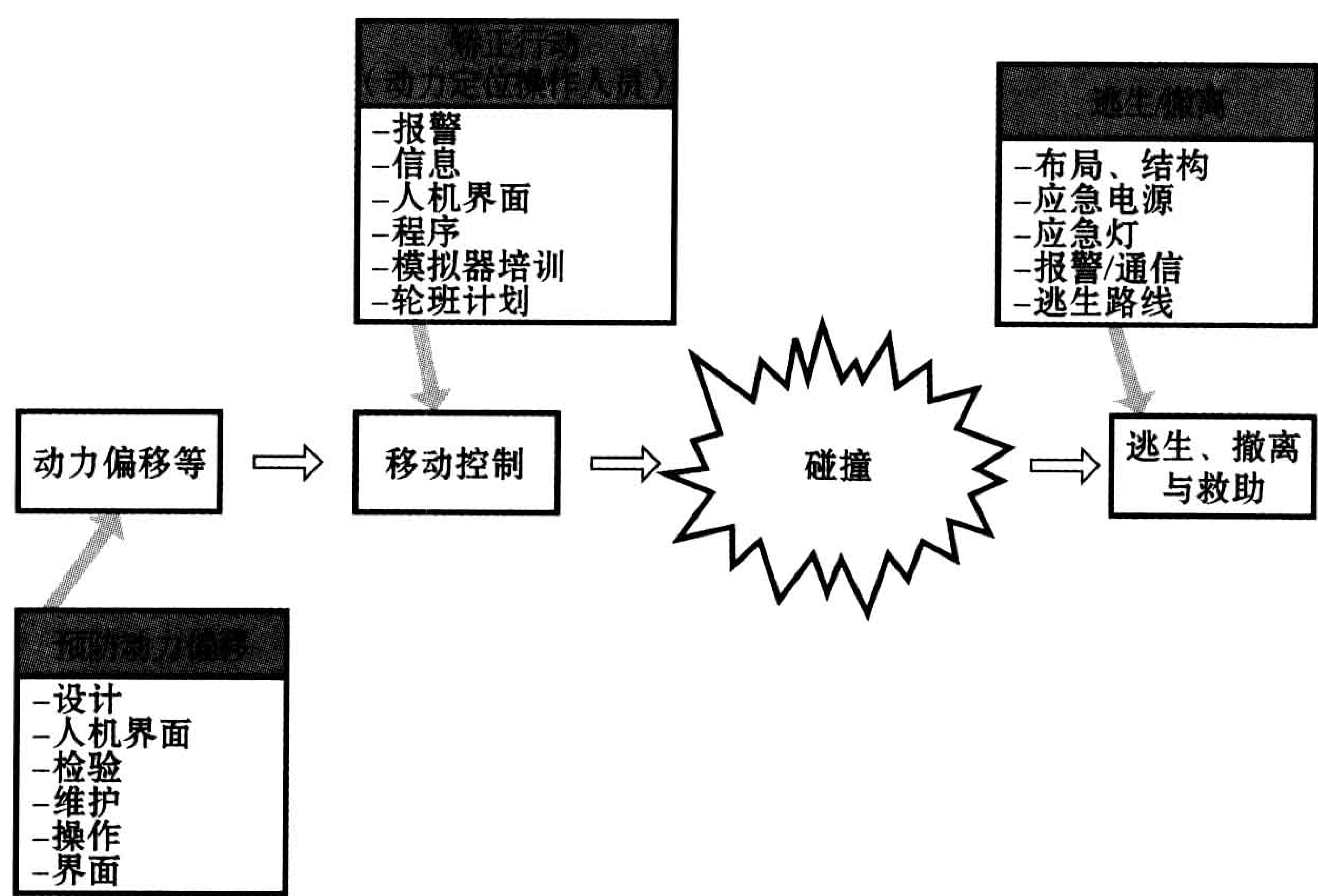


图 11.13　对预防碰撞危险后果进行屏障建模

11.4.6　各种风险的分析 Analysis of Risk Aspects

11.4.6.1　从偶发事件、虚惊事件与调查问卷得出的经验 Experience from Incidents, Near-misses and Questionnaires

表 11.2 为自 1995 年起至 2002 年年底上报的在北海海域发生的 19 起动力定位油船串列加载偶发事件概览，包括碰撞、虚惊事件以及“其他”事件。发生虚惊事件的油田名称暂未公开。

表 11.2　1995～2002 年间浮式生产储卸装置/穿梭油船碰撞偶发事件与虚惊事件

年份	海域	阶段	原　因	偶发事件类型			动力定位等级
				虚惊事件	碰撞	其他	
1996	英国	加载	动力定位故障		×		1
1997	英国	加载	位置参考系统故障		×		1
1997	英国	加载	操作人员失误		×		1

(续表)

年份	海域	阶段	原　因	偶发事件类型			动力定位等级
				虚惊事件	碰撞	其他	
1997	英国	加载	位置参考系统故障			×	1
1998	英国	加载	操作人员失误		×		1
1998	英国	加载	CPP 故障			×	1
1999	挪威	加载	动力定位故障	×			2
1999	挪威	加载	动力定位故障	×			2
1999	英国	断开	浮式生产储卸装置推进器跳闸	×			1
1999	英国	接近	动力定位故障	×			1
2000	挪威	加载	操作人员			×	2
2000	挪威	断开	手动方式启动动力偏移		×		2
2000	挪威	接近	动力定位故障	×			2
2000	挪威	连接	技术方式启动动力偏移	×			2
2000	英国	连接	操作人员失误	×			1
2001	挪威	加载	位置参考系统/动力定位故障	×			2
2001	英国	加载	技术方式启动动力偏移	×			1
2002	英国	加载	风向快速转变	×			1
2002	英国	加载	引擎故障			×	1
2003	挪威	加载	位置参考系统/动力定位故障	×			1

1996～2000 年间发生了 5 起意外事故。之后将近 7 年未发生任何意外事故。2006 年 11 月 13 日，挪威海域的 Njord 油田由于主机断电造成一起小型碰撞事件。以下为已经发生的意外事故(Chen，2002)：

- 1996 年：Emerald 浮式储油平台，1996 年 2 月 28 日；
- 1997 年：Gryphon 浮式生产储卸装置，1997 年 7 月 26 日；
- Captain 浮式生产储卸装置，1997 年 8 月 12 日；
- 1998 年：Schiehallion 浮式生产储卸装置，1998 年 9 月 25 日；
- 2000 年："挪纳"号浮式生产储卸装置，2000 年 3 月 5 日。

表 11.3 为 1995 年至 2002 年间发生偶发事件与虚惊事件概览(不包括表 11.2 中的“其他”),着重于卸载阶段和穿梭油船动力定位等级。

表 11.3 碰撞偶发事件与虚惊事件分类

		卸载阶段			
		接近	连接	加载	断开
碰撞	动力定位 1 油船	0	0	4	0
	动力定位 2 油船	0	0	0	1
虚惊事件	动力定位 1 油船	1	1	3	1
	动力定位 2 油船	1	1	4	0

在碰撞偶发事件中,4 起与动力定位 1 油船有关,仅有一起与动力定位 2 油船有关。4 起与动力定位 1 油船有关的偶发事件均发生在加载阶段,而一起与动力定位 2 油船有关的偶发事件发生在断开阶段。

在 12 起虚惊事件中,仅有超过一半发生在加载阶段,2 起发生在接近与连接阶段,另外一起发生在断开阶段。动力定位 1 油船与动力定位 2 油船发生虚惊事件的数量一样。这也可以通过虚惊事件与偶发事件之间的比率看出,动力定位 1 油船与动力定位 2 油船之间的比率大不相同:

- 动力定位 1 油船:6 ∶ 4;
- 动力定位 2 油船:6 ∶ 1。

尽管得到的数据依据很有限,但也可以看出,与动力定位 1 油船相比,动力定位 2 油船能够更好地控制异常事件的发生,而这并不奇怪。

动力定位 1 穿梭油船与动力定位 2 穿梭油船之间存在差异到底有何意义呢(动力定位 2 穿梭油船的动力定位系统所有有效部件中均存在冗余)? 实际上,这对于异常行为发生频率(例如卸载过程中的前进移动)和恢复正常情形的能力都非常重要。

11.4.7 事故与事件发生频率的趋势 Trends in Occurrence Frequencies

图 11.14 为发生在英国与挪威海域的虚惊事件(“偶发事件”)和事故一览。

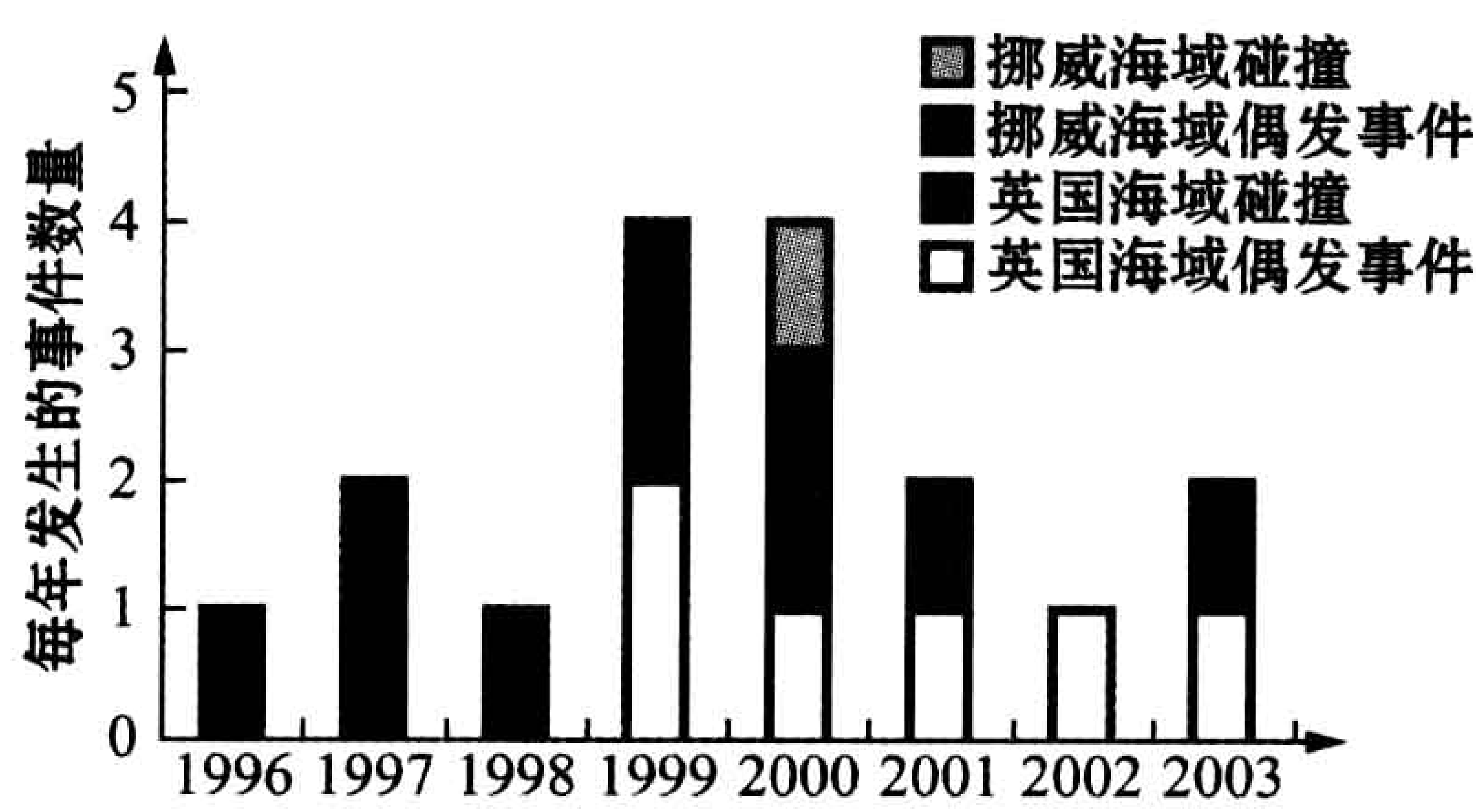


图 11.14 英国与挪威海域偶发事件与碰撞一览

从图中可以看出,英国海域的事故发生在 1996～1998 年间,而那时起偶发事件的数量也差不多。

在挪威海域,偶发事故发生在 1999～2003 年间,而 2000 年发生了一起事故。从整幅图可以看出,在过去几年中,事故与偶发事件的发生均呈下降趋势。另一方面,由于数据不足,因此无法得出明确的发生趋势。

11.4.8 碰撞能量与后果 Collision Energy and Consequences

大多数已经发生碰撞冲击的撞击速度都非常缓慢。在表 11.2 列出的 5 起意外事故中,1996 年那起碰撞的详细情况完全无从获悉,但是从总体上来看,当时的撞击非常轻微。对于在英国海域发生的撞击,根据已知信息已估计出以下撞击速度:

- 0.10kn;
- 0.11kn;
- 0.16kn。

因此,这些偶发事件中的撞击能量其实都非常低,在 0.13～0.32MJ 的范围内。“挪纳”号浮式生产储卸装置发生意外事故时的冲击速度为 0.6m/s (1.2kn),冲击能量为 31MJ,这使得这场意外事故成为在西北欧海域发生的最严重碰撞之一。这说明在这些场景中存在出现高碰撞能量的可能性。

英国海域发生的意外事故造成的后果微不足道。“挪纳”号浮式生产储卸

装置碰撞仅对浮式生产储卸装置和穿梭油船造成了最轻微的结构损坏。

应当注意，只有极高的碰撞能量才可能损坏液货舱。大多数穿梭油船冲击事故发生在浮式生产储卸装置/浮式储油平台艉部，离货物摆放区有一段距离，通常有机舱或类似舱室作为保护。

11.4.9 张紧式锚链的意外事故与偶发事件 Accidents and Incidents for Taut Hawser Configurations

第 11.4 节的开始部分指出，张紧式锚链不在风险评估考虑的范围之内。尽管如此，也值得对由张紧式锚链造成的意外事故与偶发事件进行探讨。

到目前为止还未发现任何关于张紧式锚链在加载过程中导致碰撞或虚惊事件的报告，但是的确曾经发生过一起张紧式锚链偶发事件。1986 年年底，Petrojarl 1 浮式采油平台(张紧式锚链)在刚刚投入使用的第一个月内发生了一起虚惊事件。但是 1995 年之前实际发生的张紧式锚链偶发事件数量仍然未知。

还应当注意，张紧式锚链卸载经验数据仅占利用动力定位系统操作的卸载经验数据的 20%甚至更少。即使张紧式锚链碰撞概率与动力定位油船碰撞概率一样，也不一定会造成意外事故。

11.4.10 动力偏移时碰撞频率的主要贡献因素 Main Contributors to Collision Frequency, in Drive-off

Vinnem et al. (2003c)根据偶发事件经验以及各种专家评价对影响碰撞频率的主要因素进行了评估，参见表 11.4。对于表格以及图示中列出的影响碰撞频率的主要因素，应当考虑其数量级的值，而非确切的估计值。

技术和人为/操作可靠性共同被视为最重要的影响因素；根据专家评价，这些因素造成了约 40%的碰撞。

人为/操作因素既可以单独影响碰撞频率，也可以与其他因素结合在一起影响碰撞频率。实际上，该评估认为，人为/操作因素且很可能和其他因素一起，造成了 80%的碰撞。这是因为图中“人为/操作”圈的各个部分都被考虑在

内，包括与其他因素重叠的部分。

表 11.4 风险影响因素群组合排序（专家评价）

风险影响因素群/风险影响因素群组合	排序	影响/%	说 明
1. 仅技术可靠性	4	10	技术可靠性 10%；人为/操作可靠性 15%；40%；15%；8%；10%；2% 外部条件
2. 仅人为/操作可靠性	2	15	
3. 仅外部条件	7	2	
4. 技术可靠性和人为/操作可靠性（组合）	1	40	
5. 技术可靠性和外部条件（组合）	6	8	
6. 人为/操作可靠性和外部条件（组合）	5	10	
7. 技术可靠性、人为/操作可靠性和外部条件（组合）	3	15	

类似的是，专家认为技术可靠性（很可能和其他因素一起）造成了约 70％的碰撞偶发事件，而外部条件总共造成了约 35％的碰撞偶发事件。由于重叠部分被计算了两次，因此百分数之和其实超过了 100％。

11.4.11 经验数据 Experience Data

11.4.11.1 挪威海域 Norwegian Sector

对经验数据的评估基于以下数据源：

- 挪威国家石油公司（Tveit，2003）；
- 计算机辅助船舶交通（COAST）数据库（Safetec Nordic，1996）。

1995 年 1 月 1 日至 2003 年 12 月 31 日期间，穿梭油船在钻井中的加载作业总数估计超过 1600 次，柱状图见图 11.15。1996 年加载作业次数并不多，自 2000 年开始加载作业次数处于平稳状态，每年 300 多次。

在挪威，仅有一个油田利用张紧式锚链进行卸载作业，即 Petrojarl 1 浮式生产储卸装置，它利用张紧式锚链在 Glitne 油田作业，但是下图中并没有将其包括在内。

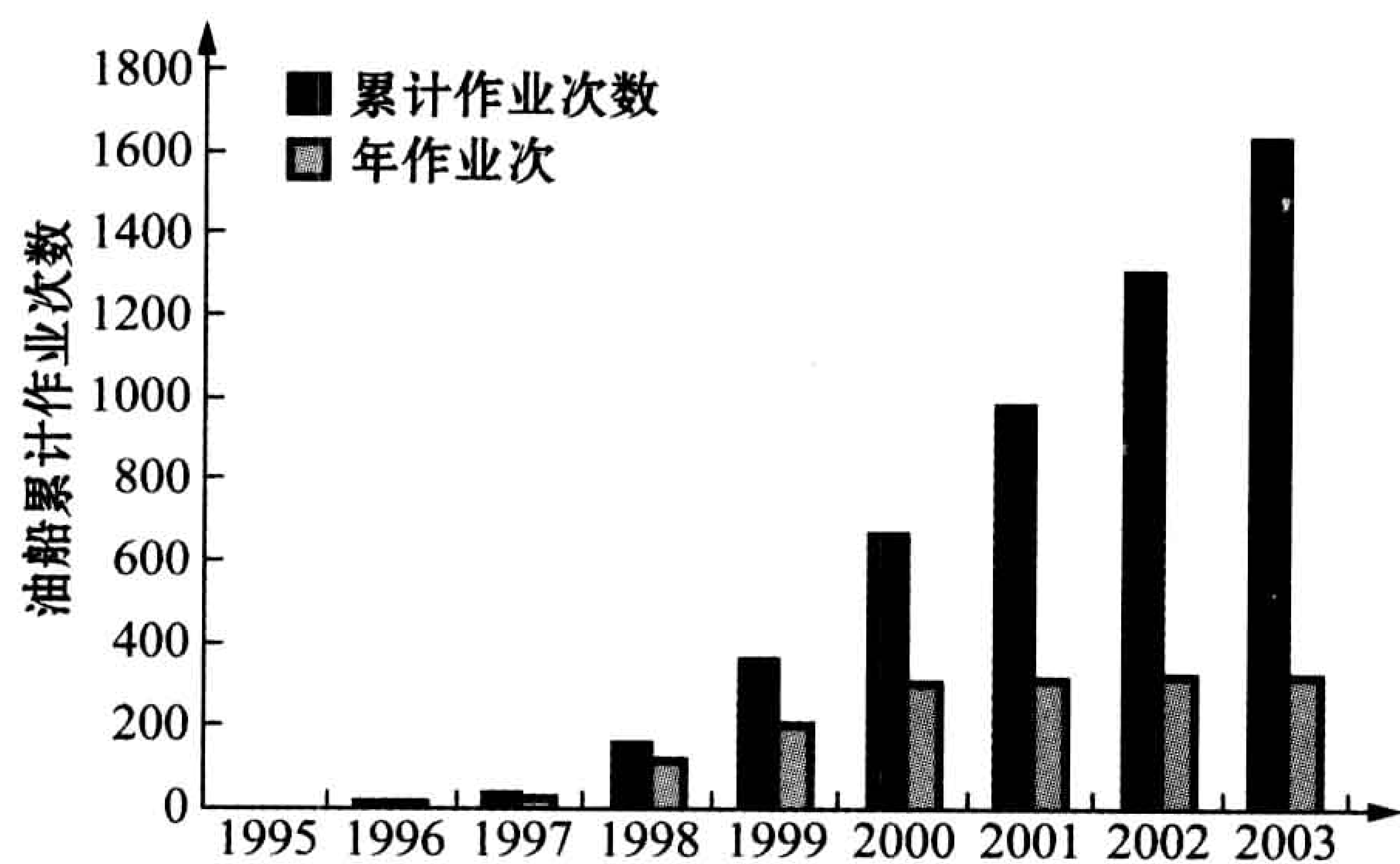


图 11.15　挪威海域穿梭油船从利用动力定位系统操作的加载浮式生产储卸装置/浮式储油平台加载作业次数

11.4.11.2　英国海域 UK Sector

对经验数据的评估基于以下数据源：

- 英国计算机辅助船舶交通(COAST UK)数据库(Safetec Nordic，1996)；
- 来源于纳维昂公司的输入数据(Wiik，2003 年)。

1995 年 1 月 1 日至 2003 年 12 月 31 日期间，穿梭油船加载作业总数估计为 3600 次，柱状图见图 11.16。

英国比挪威更早开展加载作业，但 1995 年作业次数依然不多。自 1999 年开始加载作业次数约为每年 500 次，呈上升趋势。

在英国海域利用张紧式锚链进行卸载作业的数量很高。但图 11.16 并未将其包括在内。

11.4.11.3　比较动力定位 1 油船与动力定位 2 油船 DP1 vs DP2 Tankers

自挪威海域安装第一艘浮式生产储卸装置以来，行业惯例要求在位于 62 纬度以北的所有油田中使用动力定位 2 油船。自 2002 年 1 月 1 日起，监管要求(PSA，2002d)规定应当在所有油田中使用动力定位 2 油船。但这些规范不适

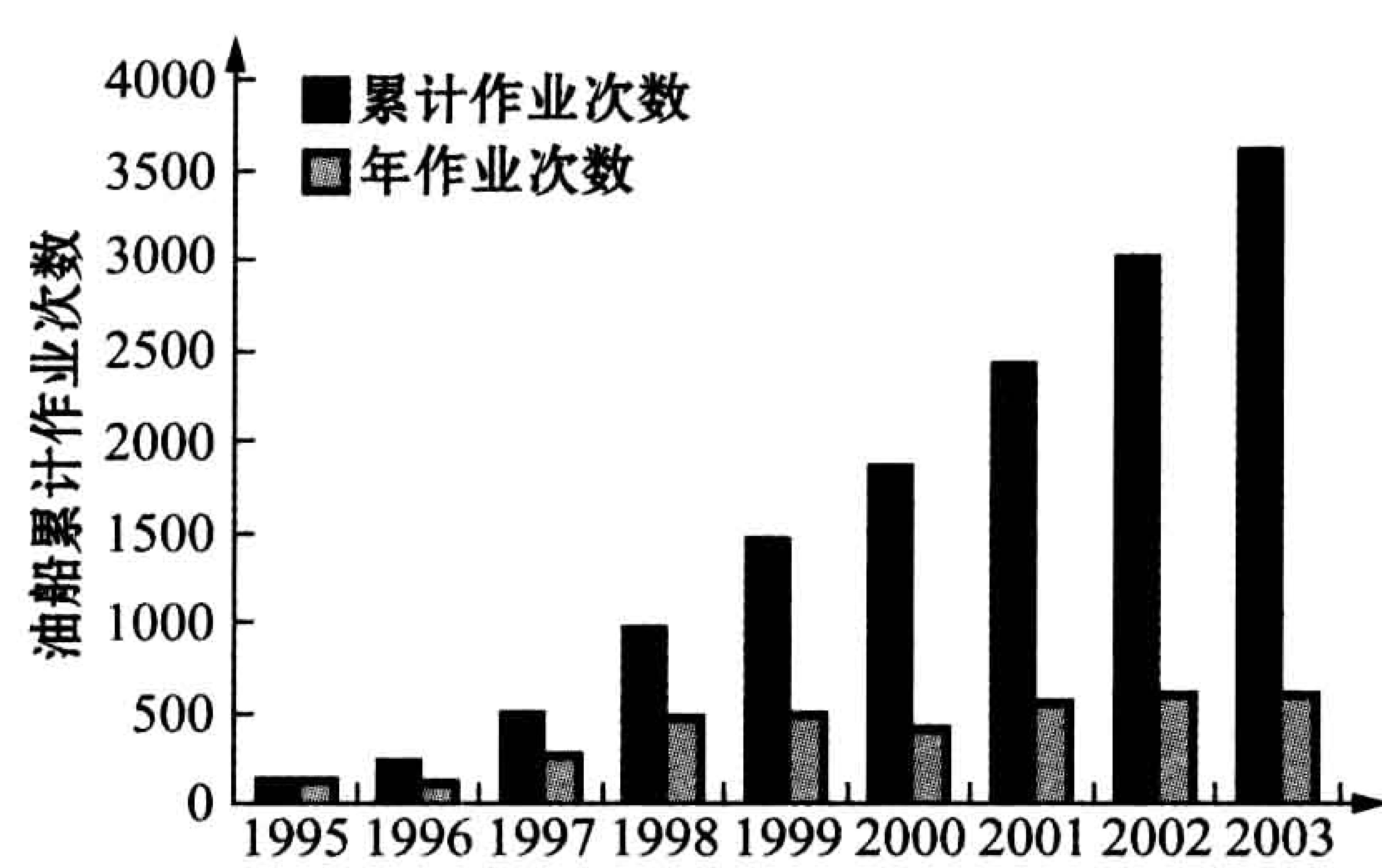


图 11.16　英国海域穿梭油船从利用动力定位系统操作的加载浮式生产储卸装置/浮式储油平台加载作业次数

用于在 2002 年以前获准使用的海上设施，也不适用于北海当中的部分油田。

可以认为挪威海域中 90%的作业都是由动力定位 2 油船完成的。

英国海上作业者协会（UKOOA）浮式生产储卸装置指导准则（UKOOA，2002）要求在环境敏感海域或大西洋边界使用动力定位 2 油船，除此之外没有使用动力定位 2 油船的特别要求。可以认为英国海域中 20%的作业都是由动力定位 2 油船完成的。

11.4.11.4　设施寿命 Installation Years

暴露数据也可以通过那些使用穿梭油船的浮式生产储卸装置/浮式储油平台设施的寿命表示。1995～2003 年间的估计值如下：

- 挪威：39.5 设施年；
- 英国：70.1 设施年；
- 总计：109.5 设施年。

11.4.12　事故频率 Accident Frequency

"浮式生产储卸装置作业安全性"研发项目（Vinnem，2003）以及 Chen

(2002)开展的工作中采用的原理提供了一种对浮式生产储卸装置和穿梭油船碰撞频率进行详细建模的方法，这包括以下方面：

- 动力偏移阻力；
- 矫正强度。

这些原理参见第 11.4 节的开始部分，其中最重要的参数是浮式生产储卸装置和穿梭油船之间的距离、穿梭油船和浮式生产储卸装置位置的动力定位等级以及超出锚泊系统范围以外的艏向保持。Chen(2002)提出了一种可以直接利用的相对较为详细的模型。但详细模型在早期概念阶段却派不上用场，而应当用于工程前期阶段与详细工程阶段。

这里介绍的评估是基于历史偶发事件的一种相对粗略的评估。在这些历史偶发事件中，穿梭油船动力定位等级(作为动力偏移阻力的一部分)是唯一被明确建模的参数。该评估将动力定位 1 等级与动力定位 2 等级区别开来。这是因为动力定位等级被视为动力偏移阻力的重要参数。

可根据“设施年”或“卸载作业”来表达频率。每年进行十几次卸载作业的海上设施与每周进行超过两次(即每年 100～150 次)卸载作业的油田之间差异很大。

因此，根据“卸载作业次数”最适合反映油田特性之间的差异。

11.4.13 平均碰撞频率 Average Collision Frequency

根据第 11.4.11 节提供的数据，已计算出 1995～2003 年间英国与挪威海域的平均碰撞频率为：

- 每次离岸加载作业 $1.0 \cdot 10^{-3}$(每 989 次离岸加载作业发生 1 起碰撞)
- 该数值来源于 5 起碰撞和大约 4950 次离岸加载作业。

根据第 11.4.11 节提供的数据，已计算出 1995～2003 年间英国与挪威海域动力定位 1 油船的碰撞频率为：

- 每次离岸加载作业 1.51 · 10^{-3}(每 662 次离岸加载作业发生 1 起碰撞)
- 该数值来源于 4 起碰撞和大约 2 650 次离岸加载作业。

根据第 11.4.11 节提供的数据,已计算出 1995～2003 年间英国与挪威海域动力定位 2(原文为"1",应与上节有区别,故改为"2"——译者注)油船的碰撞频率为:

- 每次离岸加载作业 4.4 · 10^{-4}(每 2 300 次离岸加载作业发生 1 起碰撞)
- 该数值来源于 1 起碰撞和大约 2 300 次离岸加载作业。

11.4.14　碰撞频率的趋势 Trends in Collision Frequencies

第 11.4.11 节中明确表示评估可使用的数据依据相对较少。因此,是否应当对趋势进行估计还有待商榷,因为不确定性很高。

另一方面,英国海域发生的最后一起碰撞还是在许多年以前(1998 年 9 月),而之后已经进行的 4 000 多次卸载作业仅造成一些虚惊事件。如果计算自 1995 年起英国海域每年的累计值,这期间的结果如图 11.17 所示。动力定位 1 油船与动力定位 2 油船同时包括在内。

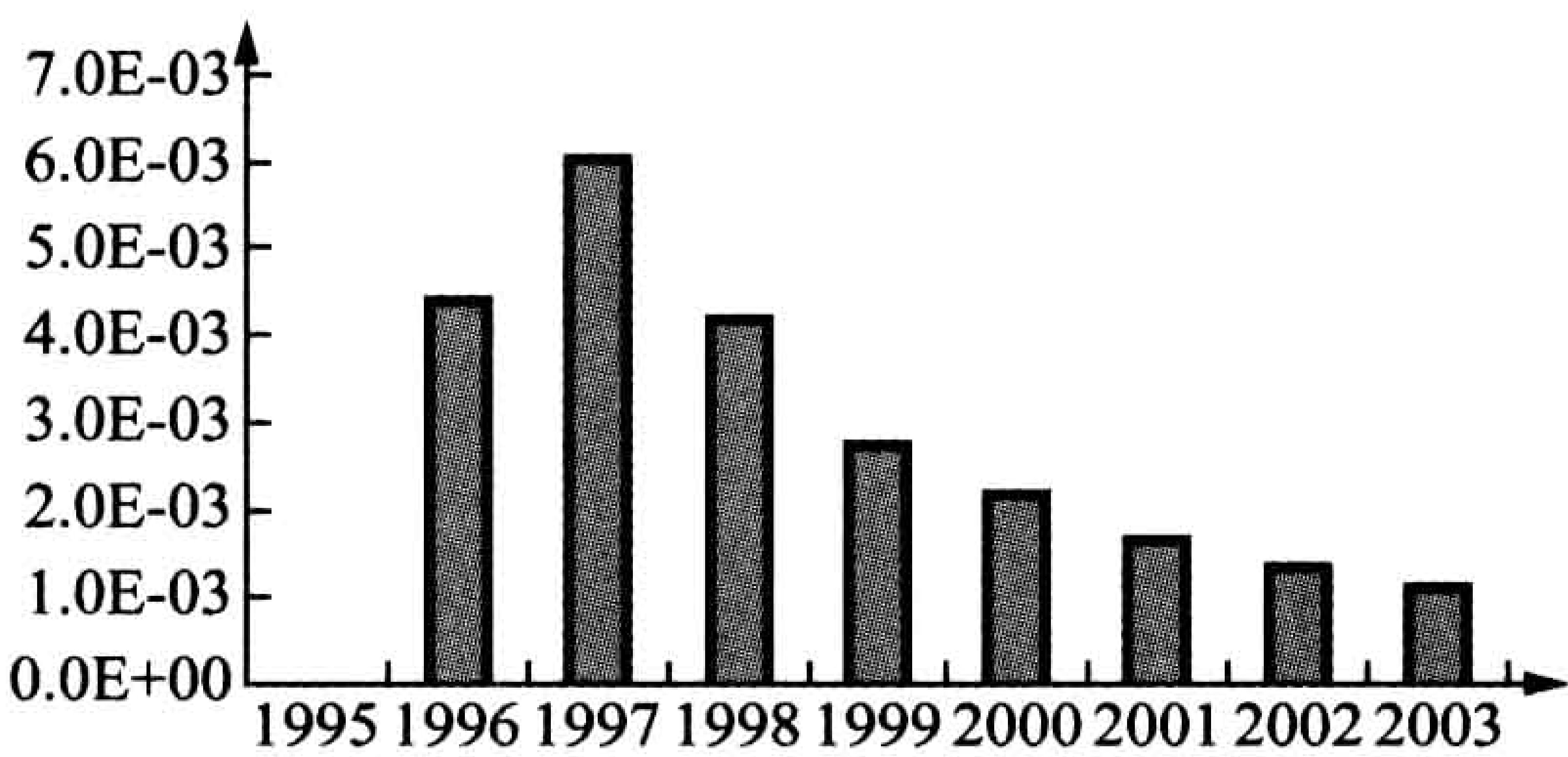


图 11.17　自 1995 年起英国海域累计碰撞频率

利用英国与挪威海域的经验数据计算动力定位 1 油船的碰撞频率,可得出类似图形,参见图 11.18。

此外,将碰撞与虚惊事件结合在一起分析还可以得出进一步的结论。如果

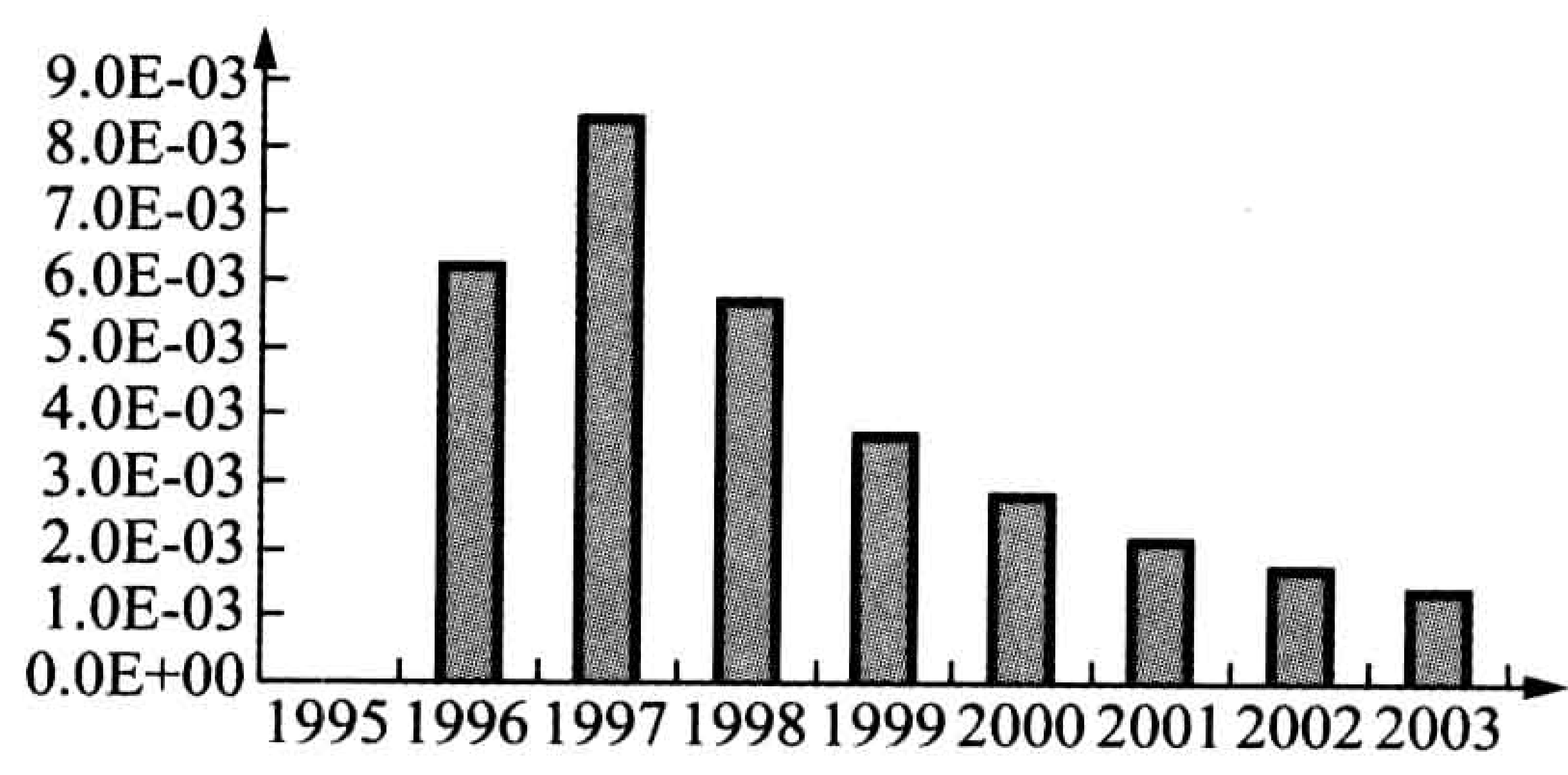


图 11.18　自 1995 年起动力定位 1 油船累计碰撞频率

仅考虑动力定位 1 油船，则最后一起碰撞发生在 1998 年，但是其后每年都会发生一些虚惊事件。碰撞与虚惊事件的累计频率如图 11.19 所示。

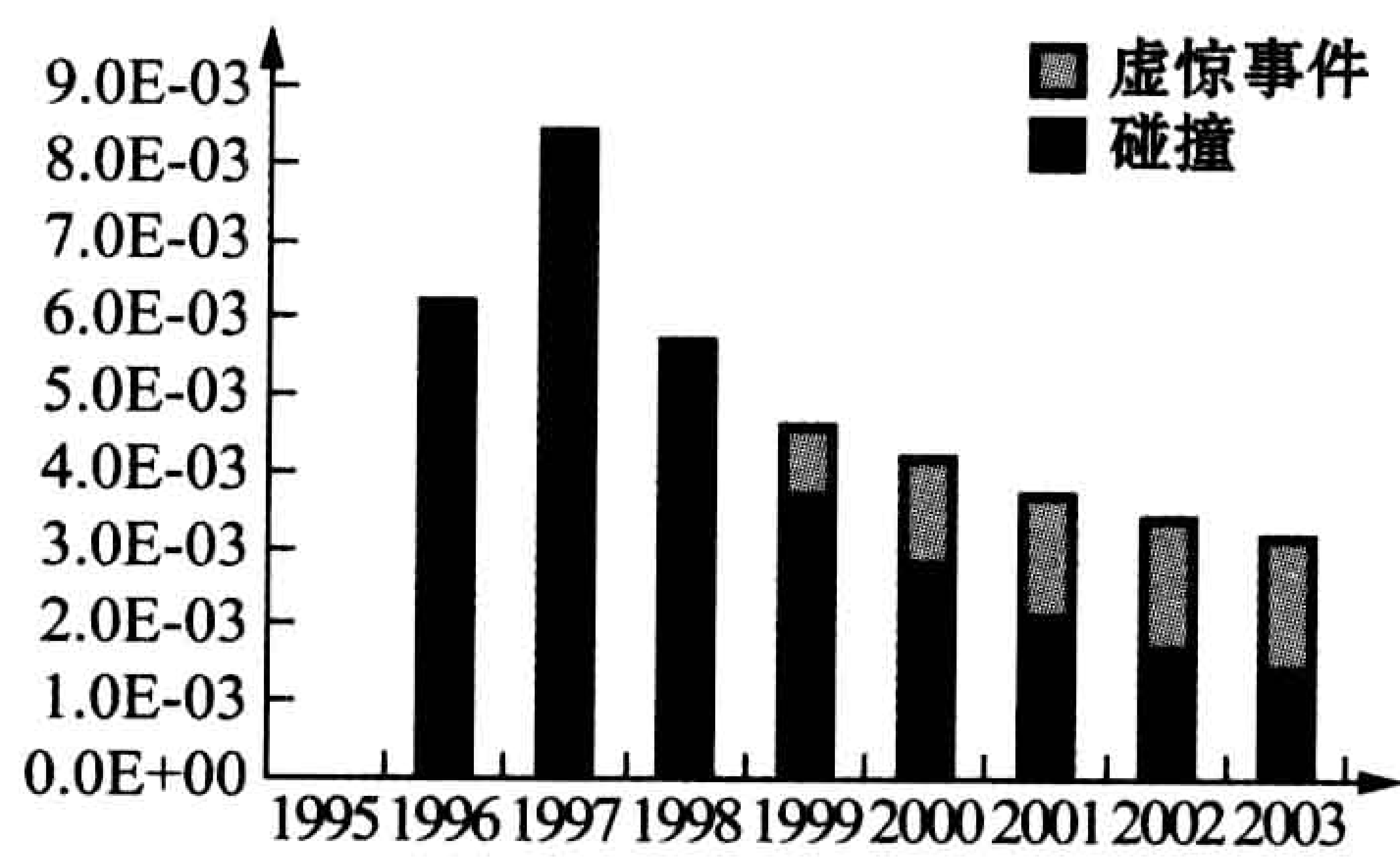


图 11.19　自 1995 年起动力定位 1 油船累计碰撞与虚惊事件频率

以上图形均呈现出一种下降趋势。问题是哪一种频率才能够反映未来的作业。考虑以下估计值：

- 平均碰撞频率，动力定位 1 油船，1995～2003 年间：每次离岸加载作业 $1.51 * 10^{-3}$；
- 平均碰撞频率，动力定位 1 油船，1998～2003 年间：每次离岸加载作业 $4.4 * 10^{-4}$。

动力定位 2 油船仅发生过一起碰撞，因此无法预计其趋势。还应注意，由于数据有限，因此差异从统计角度来看并不重要。图 11.20 已清楚地表明这一点。

这样看来，1998～2003 年间动力定位 1 油船的碰撞频率并不具备代表性。

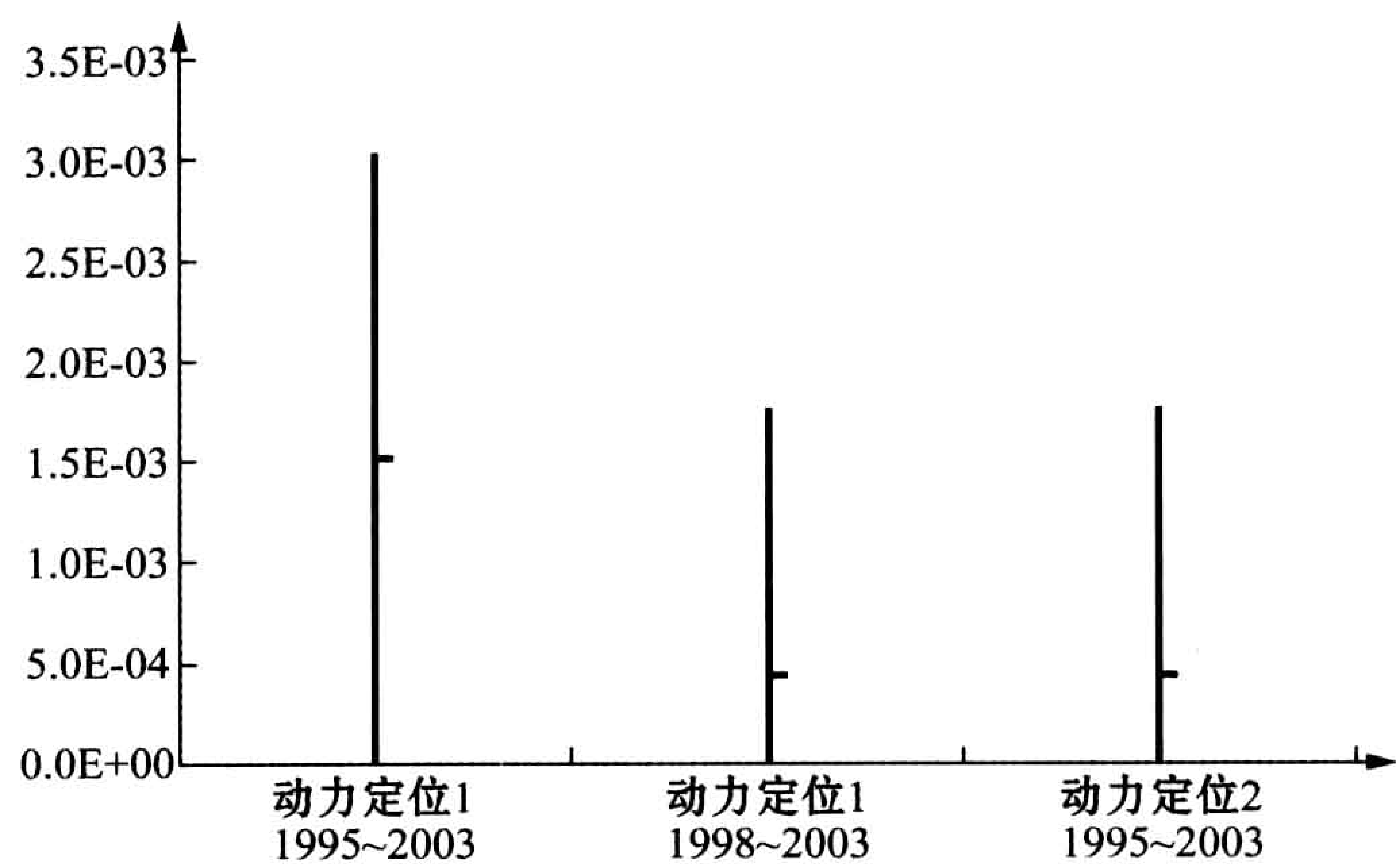


图 11.20　动力定位 1 油船与动力定位 2 油船之间的比较、计算值以及预测区间

如果考虑从 1998 年 1 月 1 日起至今的频率，一旦发生第二起事故，频率就会上升一倍。另一方面，整个 1995～2003 阶段的频率由于太高，很可能也不具备代表性，所以应当使用这两个估计值之间的一个值。

11.5　浮力损失 Loss of Buoyancy

浮力损失风险评估项目进行深入研究的另一种危险是水中气柱造成的浮力损失，通常因水下气体喷发产生。钻探船曾数次报道发生过此类事故。

在浮力损失风险评估项目开展过程中进行过大范围模型测试（Sandvik，1988），并对大规模气体喷发率进行过模拟。由于气柱导致上升水流流速极快，因此在任何情况下都不会出现浮力损失，而实际上唯一的影响时带有最高气层井喷率的净上升力（见第 12.6 节）。

该项目也对位于浮筒下方的立管破裂进行了模拟，得出的结果一致。因此测试结果显示，水中气柱造成的浮力损失对于半潜式设施来而言并非真正的危险。

Sandvik（1988）针对 11 起浮力损失偶发事件进行了调查，其中 8 起涉及驳船或船型结构，另外 3 起涉及半潜式设施。主要结论如下：

- 在所有涉及船舶沉没的事故中(约为三分之一),船舶沉没均与气柱密度降低无关。因打开的隔舱中发生爆炸和进水导致船体损坏才是船舶沉没的主要原因。
- 在大多数事故中,尤其是在船舶或驳船上,可见明显的干舷高度损失以及翻涌方向出现的横倾或侧倾角。
- 干舷高度低的船舶或驳船最容易沉没。大量的水会涌上这种船的甲板。而在半潜式设施中则没有发现这一情况。以下现象是造成船舶浸水的主要原因:
  - ○ 水面以及中心翻涌泡沫层上升;
  - ○ 船体上的水流力与带有来自于甲板平面的系泊锚索的锚系统相互作用,产生侧倾力矩,如图 11.21 所示。

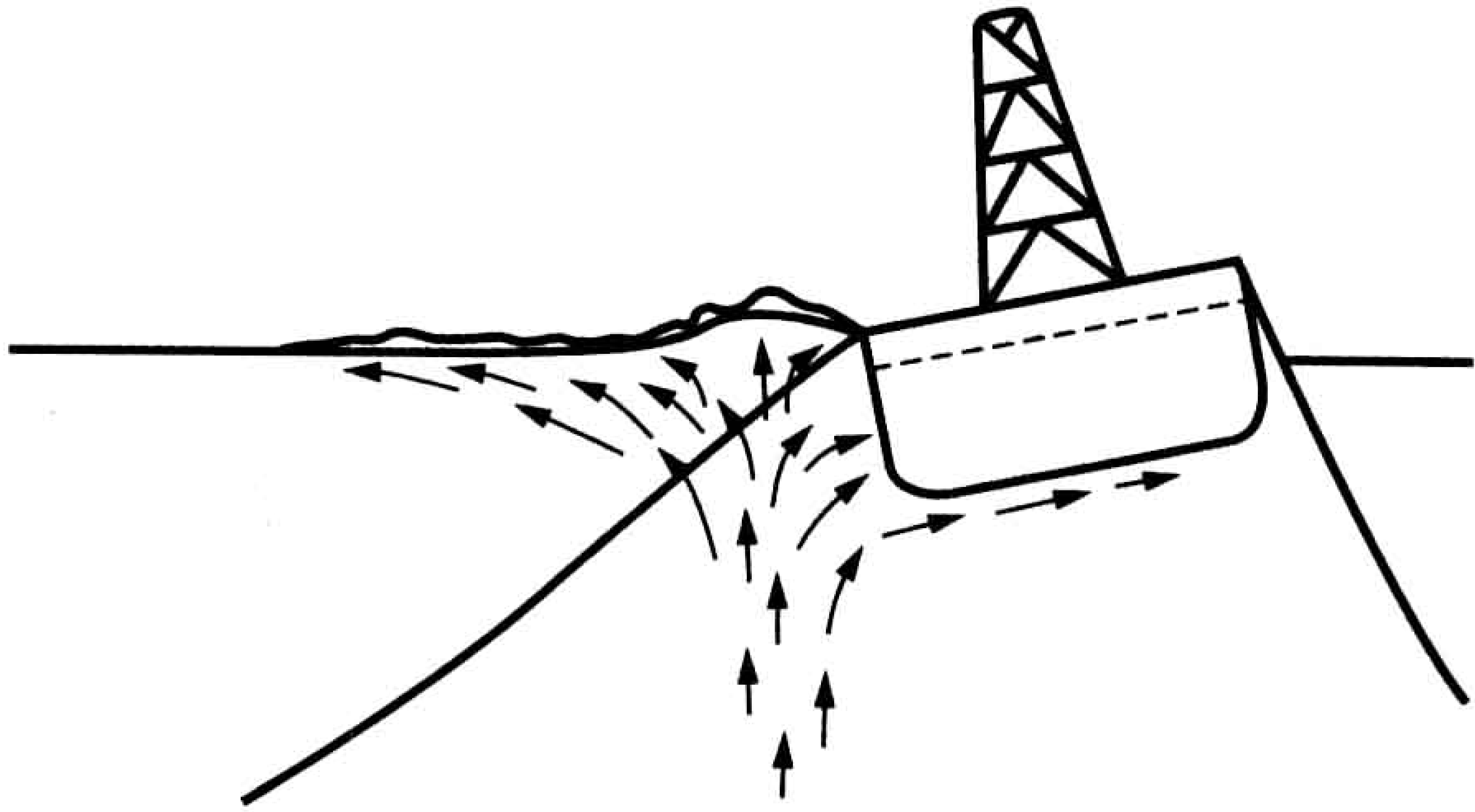


图 11.21 单壳船舶被推向一边,系泊锚索产生的力会导致船舶向气柱倾斜

11.6 事故性权重条件 Accidental Weight Condition

理论上,事故性权重条件(例如不对称权重条件或部分锚索故障)可能导致半潜式设施倾覆。根据浮力损失风险评估项目得出的结论(Vinnem, 1988),发生这些事件的概率极低,可以忽略不计。

应当注意,2004 年 12 月,挪威海域"海洋前卫"号钻井平台的两个锚索同时出现故障,造成 8～10°横倾角,该横倾角虽然很大,但完全没有达到临界水平。

第 12 章　其他危险引起的风险

Risk due to Miscellaneous Hazards

在以下的章节中，我们将重点关注起重机上物体坠落事故，而其他危险事故将只作简要概述。

12.1 起重机事故 Crane Accidents

以往的事故和偶发事件经历可用于再现风险画面。如果我们从物体坠落开始回顾，那么北海所发生事故的主要情形有：

- 在事故中，因整台起重机从船上倾覆入海中而导致数人丧生，但此类事故仅发生于1990年之前；
- 船上设备因坠落物体对甲板的冲击而损坏；
- 水下井口在勘探钻井期间因防喷器坠落而损坏。

在1975～1985年间，起重机的意外事故发生得尤为频繁，几乎每年都会在北海发生一次。但是在1985年后，却仅发生过一次。这次事故发生在1988年，当时海面波涛汹涌，船上起重机的吊钩被挂住，结果导致起重机倾翻入海中。所有的致死事故均发生在英国境内的北海区域。

1998年12月3日，在美国墨西哥湾的Petronius油田，为钻塔平台安装生产甲板时发生了一起较为特殊的起重机事故，当J. Ray McDermott公司的DB50驳船为Texaco公司Petronius项目在约530m水深处吊装两块甲板组件时，其中一块组件落入了墨西哥湾。当天早些时候，北部组件已经被DB50驳船吊装入对应的钻塔结构，并正在进行加固。北部组件重达3 876t，含有井台、电源和压缩设备。坠入海中的南部组件重达3 605t，包含了生产设备、注水设备和人员休息所。

南部组件在被吊起的过程中突然与支撑设备断开。在它落到海底之前，还撞上了运输驳船和DB50驳船。两艘船都遭到一定程度的损坏。

时常有报道称起重机的小事故频繁发生，但这些事故似乎并没有被系统记录下来。曾经有人为PSA公司做过一份详细的载荷坠落原因研究报告，但报

告只有挪威语版本(Drangeid, Grande and Skriver, 2005)。

12.1.1　坠落物体冲击力建模 Modelling of Dropped Object Impact

坠落物体的风险建模通常表现为以下公式：

$$P_{\mathrm{FDI}} = \sum_{I} N_{\mathrm{i}} P_{\mathrm{Di}} \sum_{J} P_{\mathrm{Hij}} P_{\mathrm{Fij}} \tag{12.1}$$

式中：

P_{FDI}——为坠落物体冲击力造成设备故障的概率；

N_{i}——为每种载荷类型 i 的起吊次数；

P_{Di}——为类型 i 载荷从起重机上坠落的概率；

P_{Hij}——为类型 i 载荷坠落时击中设备 j 的概率；

P_{Fij}——为设备 j 受类型 i 载荷冲击后发生故障的概率。

载荷击中设备的概率还需根据可能被击中设备的类型、甲板上的生产设备、水上水下的支撑结构以及水下设施布局等因素进一步建模。

由于冲击力和能量水平密切相关,除了载荷击中设备的概率外,还需要将载荷冲击的能量和能量转换确定为故障概率。这些方面将在后文逐一单独讨论。首先考虑坠落事故的物理建模。

12.1.1.1　起重机载荷分布 Crane Load Distributions

起重机对于离岸平台的运作至关重要。尤其在钻井阶段,起重机几乎是不间歇运转。即便在进行常规生产时,起重机也需要经常运转。

起重机载荷的范围从轻量级到重达 30t 的多个钻铤。此外,重达 150～220t 的防喷器由井架绞车吊起。物体的质量和速度决定了其自由落体时的能量和由此产生的破坏力。载荷重量越大,起重机故障的概率也越大。因此,统计起重机工作时的载荷分布十分重要。表 12.1 显示两种具有代表性的载荷分布。

表 12.1 不同生产阶段的载荷分布

载荷类型	载荷分布/%	
	同时进行钻井和生产	常规生产
重型或多个钻铤	22.2	0
其他重型载荷(>8t)	0.3	0.7
中型载荷(2～8t)	27.1	33.6
轻型载荷(<2t)	50.5	65.7
年起吊次数	20 884	8 768

该表显示海上生产设施一年内起重机工作的典型数据，分别统计于同时钻井和生产阶段以及常规生产阶段。其他调查结果得出每台起重机的年起吊次数为 2 700～30 500 次，取决于设备生产时所使用的起重机数量(通常为 1～4 台)。

防喷器主要在钻井和修井的时候进行移动，通常不使用起重机。在钻井时，防喷器可能由专用的提升或运输设备和井架绞车移动 1～5 次。据悉，防喷器移动过程中曾发生过多次坠落事故，不仅造成防喷器本身损坏，而且还损坏了水下设施。在某起事故中甚至还导致一人丧生。

除了载荷坠落，吊臂和起重机坠落事故在北海也多次发生。前者是吊臂(通常重 25t)从起重机上坠落，而后者则是起重机(通常重 60t)从底座处断开。

起重机结构或者吊臂坠落事故中的主要危险是起重机司机可能来不及逃脱，而随着起重机一起落入海中。

12.1.2 坠落载荷的物理属性 Physical Aspects of Falling Loads

在对起重机载荷坠落建模时，需要分别考虑两种主要情况：

- 载荷落在甲板设备/结构或落在其他海面以上的设施上；
- 物体落入海中，并有可能击中水中或水下设备。

第一种情况只有一个阶段，而第二种情况分为 3 个阶段，即空中下坠阶段、海面撞击阶段和水中下坠阶段。下面将重点讨论这 3 个阶段，同时对第一种情况也进行了分析。

12.1.2.1　空中下坠阶段 Fall Through Air

在空中下坠时，质量巨大的载荷将在重力作用下加速向海面坠落，因此这个阶段摩擦力影响可忽略不计。侧向移动由平台可能的移动（仅适用于浮式平台）和起重机吊钩的移动共同决定。通常情况下，坠落物体会以小于 3°的角度撞击海面，这也是它在起重机吊钩上的定位角度。

12.1.2.2　海面撞击阶段 Impact with Water

坠落物体将以速度 v_1 撞击海面，并以速度 v_2 在海中继续下坠。这两个速度可以通过下式计算得出：

$$v_1 = \sqrt{2gh} \tag{12.2}$$

$$v_2 = v_1 - \int_0^t \frac{P(t)}{m_{f_o}} \mathrm{d}t \tag{12.3}$$

式中：

g——为重力加速度；
h——为坠落高度；
$P_{(t)}$——为冲击力；
m_{f_o}——为物体质量。

式中的积分代表撞击水面时的动能损耗，积分作为一个函数，其变量有：

- 物体密度；
- 撞击时与水面的夹角；
- 坠落物体质量；
- 海水密度。

撞击水面后，物体将加速到末速度 v_t，计算公式为：

$$v_t = \sqrt{\frac{2(W-O)}{C_d \cdot A \cdot \rho}} \tag{12.4}$$

式中：

W——为重力(空中)；

o——为浮力；

p——为海水密度；

A——为横切面面积；

C_d——为根据雷诺数得出的物体形状系数。

已经知道，物体在水中下坠的过程中会侧向摆动。这些侧向摆动由撞击时物体和海面的夹角和物体的外部形状所决定。条状物体和表面积较大的物体会比块状和球状物体摆动幅度更大。摆动物体的末速度要比无摆动物体的末速度更小。

物体在水中的下坠路径还和当时的水流有关。在穿过水面以后，物体将水平移动一段距离 s，计算公式为：

$$s = \int_0^t v_0 \frac{X_t}{1+X_t} dt \tag{12.5}$$

$$X = \frac{\rho \cdot CAv_0}{2m_{f_o}} \tag{12.6}$$

式中：

v_0——为水流速度；

C——为阻力系数。

在确定坠落物在海底最有可能的坠落地点时，必须考虑到由于水流作用产生的漂移。

12.1.3 坠落载荷的概率 Probability of Dropped Loads

起重机运行时坠落载荷的概率与载荷特性和环境条件有关(在涉及采用海

上浮式设施时)。然而,通常没有足够的数据来区分不同情况下的概率差别。通常只能估算一个平均频率值,例如每次起吊作业时或每台起重机上每年的坠落平均频率。

WOAD®(DNV, 1998)很可能是人们最经常使用的记录载荷坠落、吊臂坠落或起重机底座故障等偶发事件的数据来源。如果没有引起关注并被记录下来,通常认为起重机吊臂或者底座是不可能发生故障的。对于作业中的坠落载荷,如果没有对其他设备造成损坏,这些事故很有可能就不会被记录下来。因此,根据 WOAD® 中所记录的事故得到的载荷坠落频率很可能被低估了。

通常而言,起重机发生载荷坠落的频率为每台每年 10^{-5}～10^{-4} 次。对于重大起吊作业,有时会特别强调严格按照程序进行操作,有时也称其"程序性起吊"。在这种情况下,载荷坠落的频率通常比"常规"起重机作业降低 30%～70%。

12.1.4　击中物体的概率 Probability of Hitting Objects

按照撞击后果的严重性,我们可以对被击中物体的类型进行分类:

- 甲板设备:可能破坏碳氢化合物存储设备的整体结构,可能引发火灾;
- 水下设施:可能破坏生产设备(碳氢化合物存储设备)的密封性,可能引起严重泄漏;
- 结构组件:可能造成结构故障或者破坏稳性和浮力。

12.1.4.1　坠落载荷击中甲板设备的概率 Dropped Loads on Topside Equipment

物体击中甲板设备的概率通常基于起吊时有关跨越区域的几何学考虑。除非采取特殊的管制措施,根据操作规范,起吊作业不允许跨越生产区。如果起吊载荷在通过生产区时坠落,可能会导致严重事故。甲板设备被击中的概率表示为:

$$P_{\mathrm{Hij}} = \frac{A_{\mathrm{Iij}}}{A_{\mathrm{crit\ i}}} f_{\mathrm{crit}} \tag{12.7}$$

式中：

A_{lij}——为偶然情况下，类型 i 被起吊时其下方设备 j 的面积；

$A_{\text{crit i}}$——为类型 i 被起吊时其下方碳氢化合物设备的总面积；

f_{crit}——为关键区域面积与起吊作业跨越的区域总面积的比值。

12.1.4.2 坠落载荷击中水下设施的概率 Probability of Impact on Subsea Installations

同样地，物体击中水下设施的概率通常也基于起吊时有关跨越区域的几何学考虑。

当起吊载荷跨越水下设施时，为了避免载荷坠落损坏水下设施，经常会在上升和下降时保持水平方向平衡。水下设备被击中的概率表示为：

$$P_{\text{Hij}} = \frac{A_{\text{lij}}}{A_{\text{subs i}}} f_{\text{subs}} \tag{12.8}$$

式中：

A_{lij}——为偶然情况下，类型 i 被起吊时其下方设备 j 的面积；

$A_{\text{subs i}}$——为类型 i 被起吊时其下方碳氢化合物设备的总面积；

f_{subs}——为起吊时水下设施上方面积与起吊作业跨越的区域总面积的比值。

12.1.5 冲击力的后果 Consequences of Impact

12.1.5.1 对甲板设备的影响 Consequences for Topside Equipment

甲板设备所受影响的分析原理与以下章节中水下设备所受影响的分析原理是相同的。但是，需要注意的是计算密封性被破坏和由此造成的火灾的概率时，通常只做简单分析。

12.1.5.2　对于水下设备的影响 Consequences for Subsea Equipment

在所有可能被坠落物体击中的水下设施中，水下生产系统和管线最为重要。

水下生产系统是由安装在框架上或海底围栏内的机械设备单元所组成，包括管道系统、阀门和控制系统。其作用是将为生产组件输送液体的管线或竖管与油井连接起来。最典型的水下生产系统组件是采油树，用于控制和切断井流和控制生产模块。水下生产系统组件通常重达 30t。一颗采油树高约 4m，水平面积约 $8m^2$。海底油气管线的内径可达 40inch。

采油树上的促动器是最易受到冲击的水下组件之一，可反映了水下设备的受损状况。

促动器用于控制采油树上的阀门。典型的促动器含有一个保持阀门开启的手柄。通过液压对阀门弹簧片的作用使阀门保持开启状态。因此，如果因某些问题导致液压下降，促动器可以控制阀门，隔离油井。促动器长约 1m，通常位于采油树上保护程度相对较低的部位。

冲击力产生的后果与坠落载荷撞击水下设备的实际情况有关，例如坠落载荷的速度、水下设备被击中的部位、冲击力角度、撞击时间和接触面积。对于特定载荷，这些数值很难估算，因此在确定冲击力的影响时重点关注物体间转化的能量以及能量所导致的偏转量。促动器的偏转量为：

$$y = P\frac{l^3}{3}E \cdot I_0 \tag{12.9}$$

$$P = 2m_{f_o}\frac{v}{t_d} \tag{12.10}$$

式中：

l——为长度；

E——为弹力模数；

I_0——为惯性矩；

m_{f_o}——为坠落物体质量；

v——为撞击前坠落物体的速度；

t_d——为撞击时能量转换的时间。

人们已经在理想状态下进行了一些计算，并已得知，一个 2t 重的坠落载荷可以轻易损坏促动器，而更重的载荷则很可能引起井喷。同样的载荷如果击中管线，可能造成损坏和泄漏。

12.1.5.3 对于结构部件产生的后果 Consequences to Structural Components

冲击能量、方向和接触面的几何形状等因素决定了坠落物体和坠落设备的载荷。由于坠落速度、水下轨迹/速度和对结构影响的不同，我们可以区分载荷是由长筒形物体（管道）还是大件物体产生。需要关注以下结构部件上的冲击载荷：

- 甲板；
- 模块支撑梁；
- 支撑结构；
- 浮力舱。

由于强度变化和击中概率的不同，支撑结构和浮力舱元素通常需要进一步细分。理论上，坠落载荷产生撞击的概率应基于以下因素：

- 起吊作业的频率；
- 在采取预防措施或程序性起吊时载荷坠落的频率；
- 坠落地点和高度的条件概率；
- 已知坠落地点和高度时，特定坠落物体击中特定结构部件的条件概率。对于水下结构部件，应当充分考虑物体在水中的运动规律（例如物体撞击水面时与水面的夹角、物体的形状等）；
- 已知物体坠落并发生撞击时，冲击几何结构（例如管道轴与冲击面的夹角）的条件概率；
- 已知物体坠落并发生撞击时，速度的条件概率。

由于数据不足，通常只根据数个因素进行简单研究。

12.1.6 冲击能量分布 Impact Energy Distributions

根据故障和击中情况的几何分布、频率和概率，可以计算出能量分布。以下3个例子中，撞击分别发生在浮式生产船的塔柱、模块支撑梁和甲板组件上。表12.2为撞击发生在塔柱上和其顶部，而表12.3为撞击发生在悬臂式结构和外部梁结构上。

表12.2 圆柱状物体以及塔柱的累计被击中频率

击中位置和目标	能量级数/kJ					
	0	100	200	400	800	1600
圆柱状物体在塔柱上的位置						
0～−2m	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$5.8 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$8.5 \cdot 10^{-6}$	$6.8 \cdot 10^{-6}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$
−2～−52m	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$6.0 \cdot 10^{-5}$	$3.8 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$7.7 \cdot 10^{-7}$
−52～−64m	$4.8 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-6}$	$8.9 \cdot 10^{-7}$	$3.4 \cdot 10^{-7}$
塔柱顶部储存设备	$8.9 \cdot 10^{-4}$	$8.9 \cdot 10^{-4}$	$6.9 \cdot 10^{-4}$	$6.9 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-7}$	$1.6 \cdot 10^{-7}$
塔柱合计	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$7.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$4.4 \cdot 10^{-6}$

表12.3 组件支撑梁的累计被击中频率和能量

击中位置	能量级数/kJ				
	0	200	400	800	1600
悬臂式结构	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-6}$	$2.9 \cdot 10^{-6}$
模块支撑梁	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$1.9 \cdot 10^{-6}$

12.1.6.1 冲击能量超标曲线 Impact Energy Exceedance Curves

图12.1所示为一个起重机坠落载荷冲击分布的例子。所示年度冲击频率与水下设施被击中次数有关，是冲击能量的函数。因设计原因，图中信息并不完整，物体类型和速度等也属于必要信息。

图12.2为3种不同物体撞击时的冲击能量分布，分别是两种“条状”物体（轻型和重型）和中型“盒状”（带有角边）物体。分布对应最大能量，如表12.4所示。

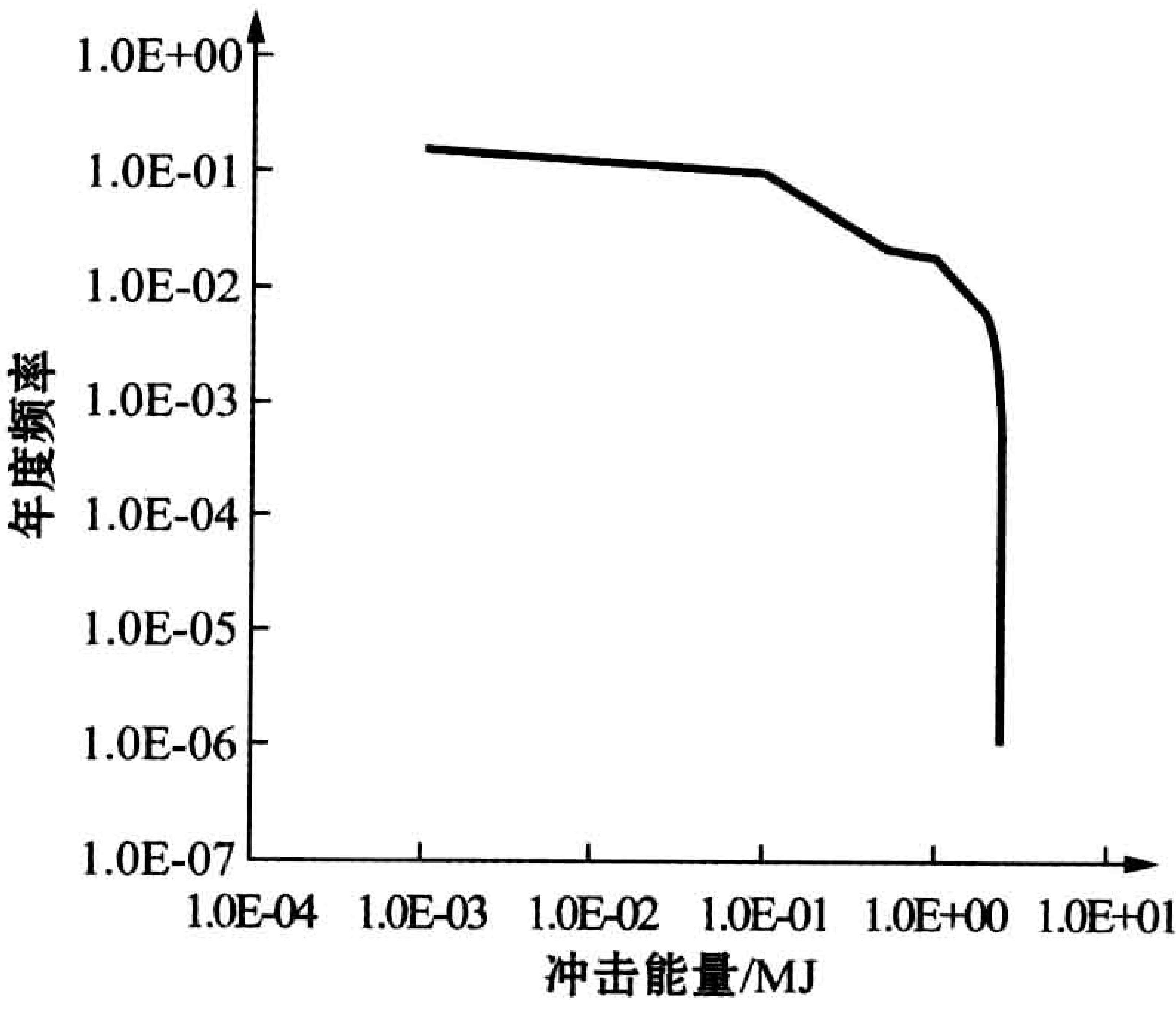


图 12.1　物体从起重机上坠落时的冲击分布

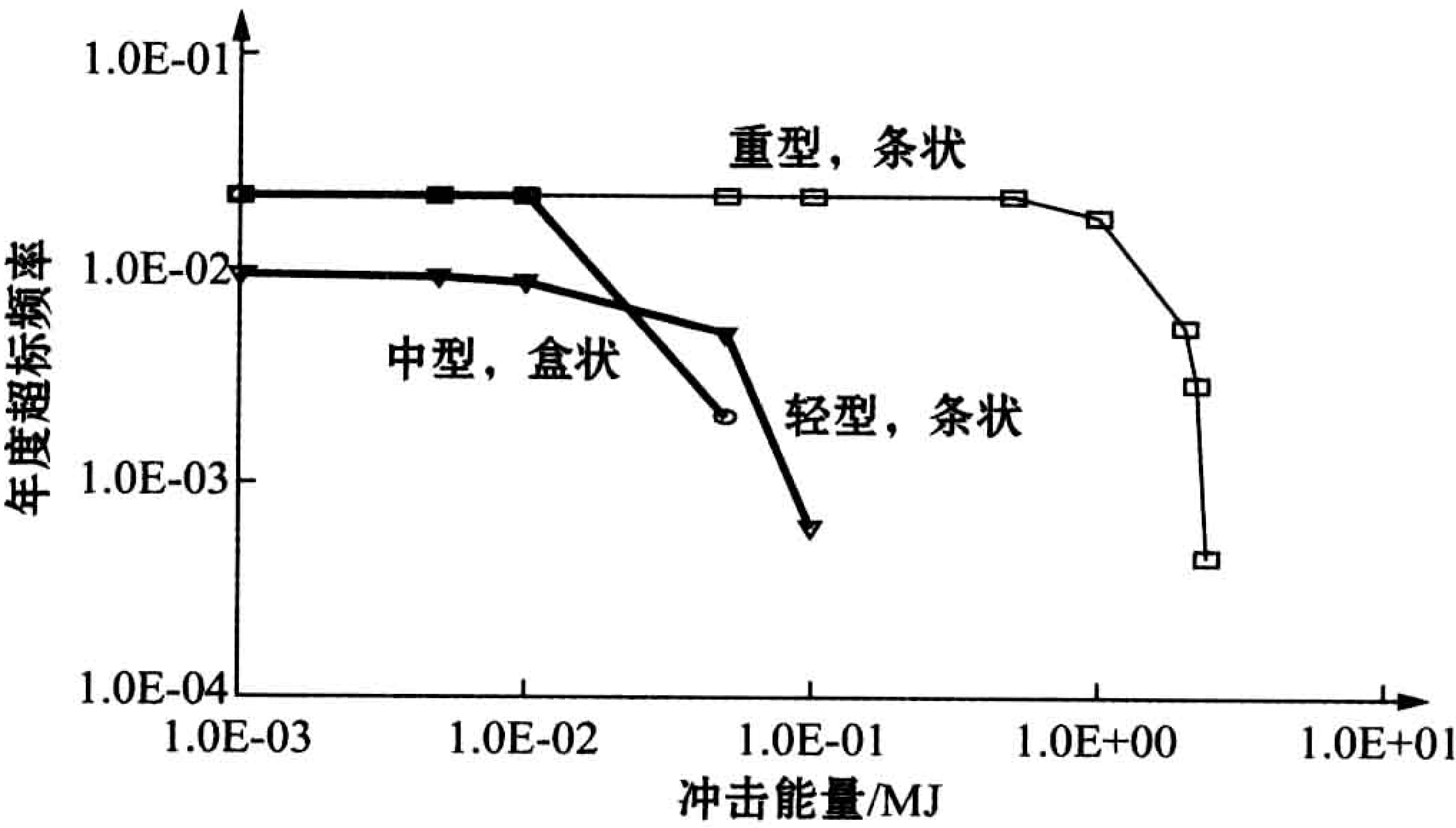


图 12.2　不同物体的冲击分布

表 12.4　坠落物体到达海底时的能量

载荷种类	重量/t	速度/ms^{-1}	冲击能量/kJ
轻型,条状	1	10.3	53
轻型,盒状	1	3.1	4.6
中型,条状	5	9.0	200
中型,盒状	5	4.0	41
重型,条状	19	12.8	1 540
重型,盒状	19	5.1	250

12.2　拖曳期间的事故
Accidents During Tow

拖曳期间的事故与自升式平台极其相关。根据 DNV(1998)中对于 1980～1983 年间 69 起自升式平台事故的记载,其中有 11 起是因为拖曳引起的。1990 年 8 月,在北海上拖曳自升式平台时也发生了严重事故。当时北海天气情况十分恶劣,“西伽马”号自升式平台在两个地点间拖曳时倾翻。但未造成人员丧生。

12.3　船员落水事故
Man-overboard Accidents

船员落水事故虽然只是职业事故中的一种,但却非常重要,这主要是因为落水船员需要快速救援艇和应急救生艇提供应急预案服务以获得救助。近来,救援中也会使用子艇。这是一种大型的应急救生艇,艇上配备一间可供船员和幸存者避护的小驾驶室和一个双推进系统。

应急装置可以安装在海上设施上或者守备船上。挪威法律规定,海上生产设施上必须安装两个独立的应急系统。而子艇上配备了双推进系统,符合这项规定。

由于在极端天气下时海浪很高,西北欧水域中的海上设施干舷高度很大。这意味着落水船员在撞击海面时已经下坠了约 30～40m,可能会因为撞击到结构部件或者海面而受伤。如果落水船员在没有穿防护服的情况下长时间处于水中,可能导致体温过低或者溺水。因此,必须在最短时间内对落水船员实施救助。

北海的救援惯例是落水船员应在落水后的 8min 内被救起。这意味着在进行海上设施外侧搭建脚手架等可能有落水危险的工作时,应急救生艇的船员必须可迅速实施救助。

12.3.1 船员落水事故的频率 Frequency of MOB Accidents

在风险等级项目(PSA，2006a)中概略介绍了挪威海域中发生的船员落水事故。而在英国,健康与安全管理局(HSE)已公布了发生海上生产和移动设施上的船员落水事故和偶发事件。图 12.3 和图 12.4 分别为挪威和英国海域事故的已知数据。应当注意,挪威海域的大部分船员落水事故发生在附属船舶上。而英国海域并没有发生这种情况。因此,不能将两者的事故频率进行直接比较。

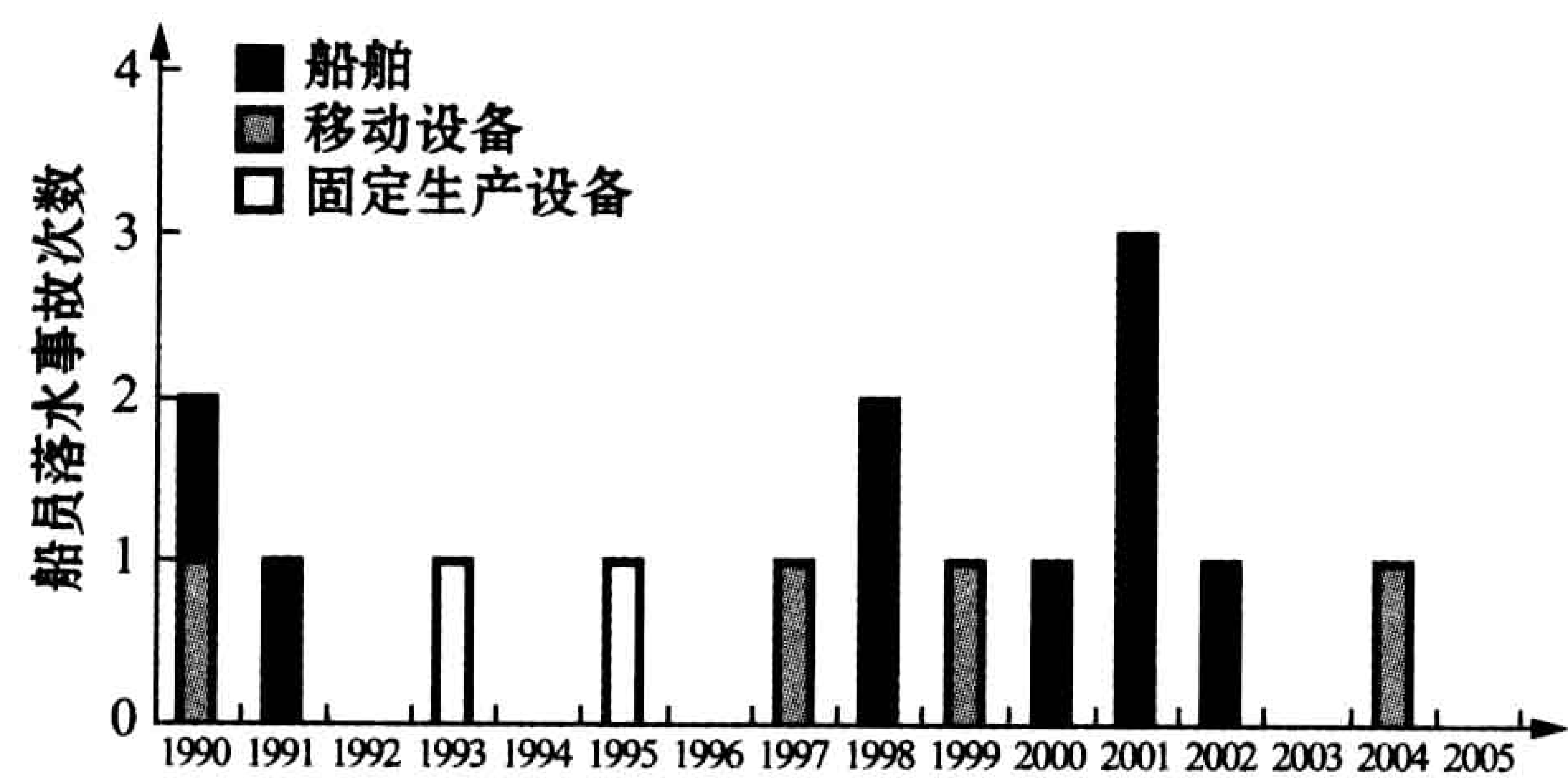


图 12.3 1990～2005 年间在挪威海域发生的船员落水事故

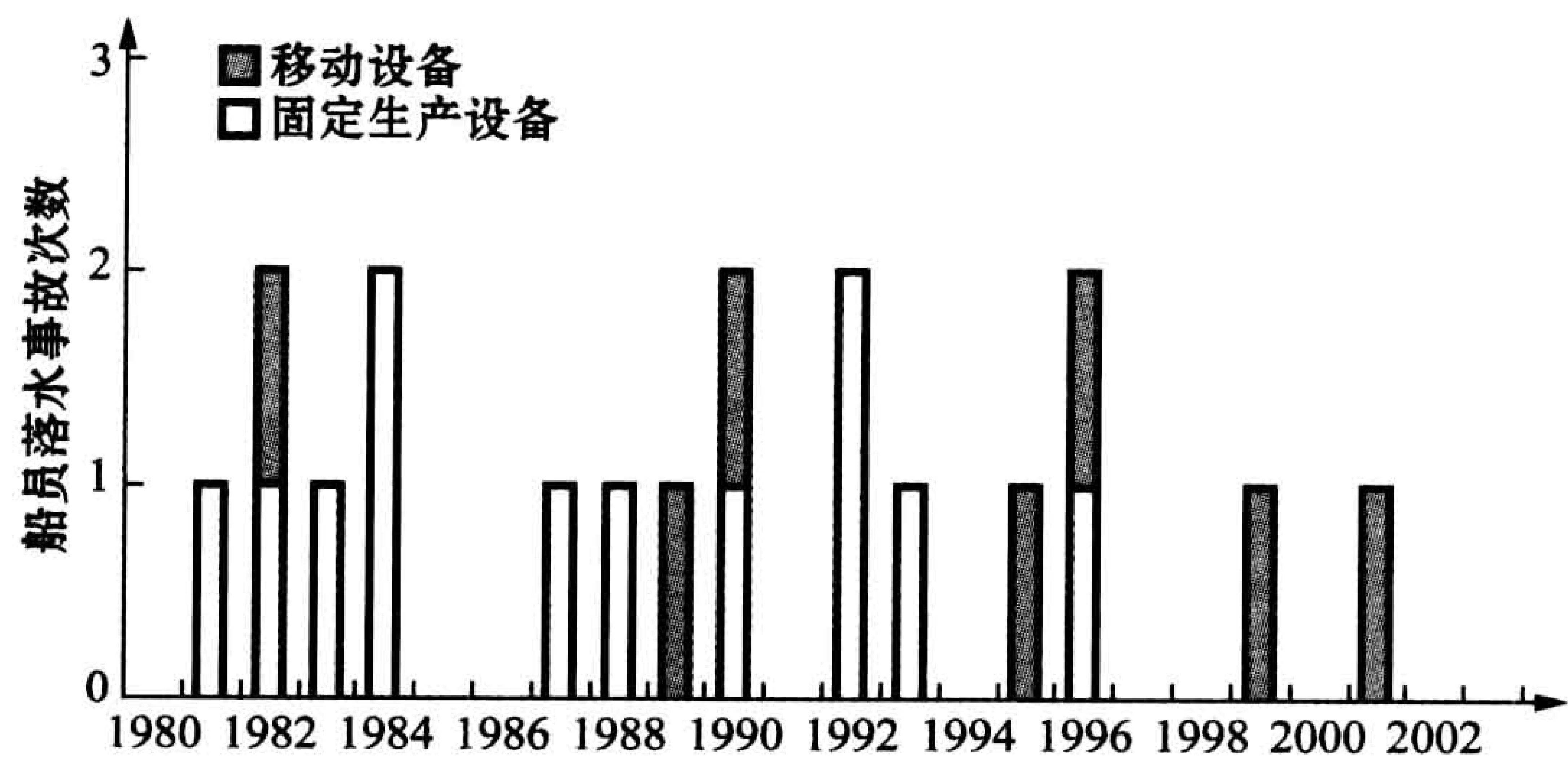


图 12.4 1980～2003 年间在英国海域发生的船员落水事故

1990～2005 年间在挪威海域的船员落水偶发事件中没有人员丧生。而相同时期,在英国海域有两人丧生,这两起事故分别发生于 1990 年和 1996 年。

前一起发生在海上移动设施上，后一起则发生在生产设施上。

为了将两块海域的情形进行比较，我们规定所考虑时间为 1990～2003 年间，地点包括海上生产和移动设施，则偶发事件发生次数为：

- 英国：10 起；
- 挪威：5 起。

另一方面可以看出，相对于海上生产和移动设施，挪威海域中在附属船舶上发生的船员落水偶发事件更多。考虑到英国海域比挪威海域拥有更多的海上设施，并且年平均工作小时比挪威海域高出 50％，在规定的工作时间中，两者事故次数的比值相差无几。计算得出偶发事件频率为：

- 英国：每 1 亿工时发生 1.5 次事故；
- 挪威：每 1 亿工时发生 1.3 次事故。

我们可以根据死亡人数来计算英国海域的死亡事故率（FAR）。此数字基于 1990～2003 年间，为海上生产和移动设施上平均值：

- 英国：FAR＝0.3。

12.3.2 涉及船员落水事故的场景 Scenarios involving MOB Accidents

上述挪威海域数据最为详细，给人们提供了一个绝佳的机会考虑船员落水事件场景。图 12.5 为挪威海域此类事件场景概况，图 12.6 则为英国海域场景概况。

由图 12.5 可知，在英国海域发生的船员落水事故大多在进行海上作业活动时发生（9 次事故中有 6 次发生在海上作业时），而在挪威海域，情况却恰恰相反（15 次事故中只有 2 次发生在海上作业时）。如果除去在船舶上发生的事故，在挪威海域这个比例减小为 6 次事故中有 2 次发生在海上作业时，还是远远小于英国海域的比例。

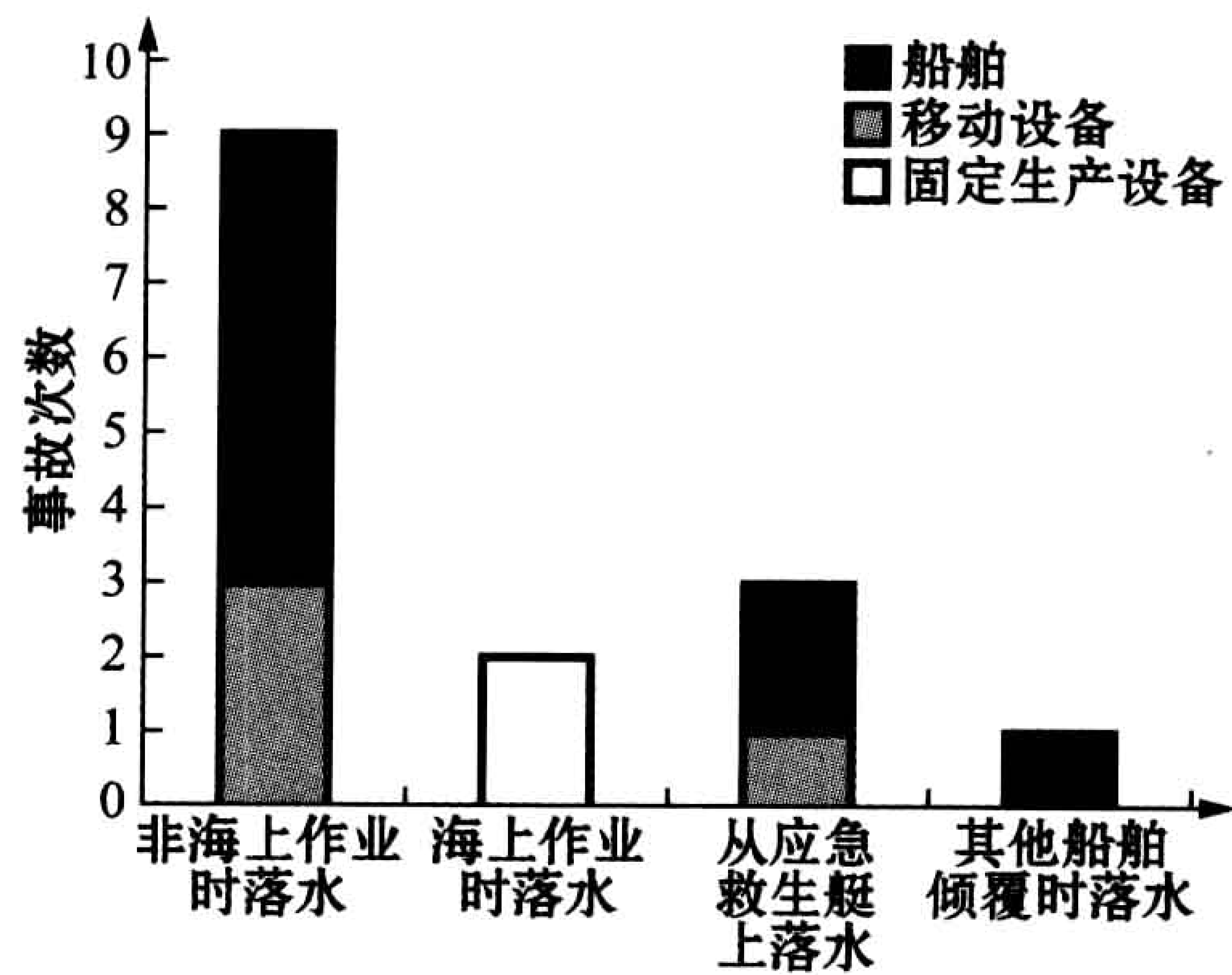


图 12.5　1990～2005 年间挪威海域船员落水事故场景

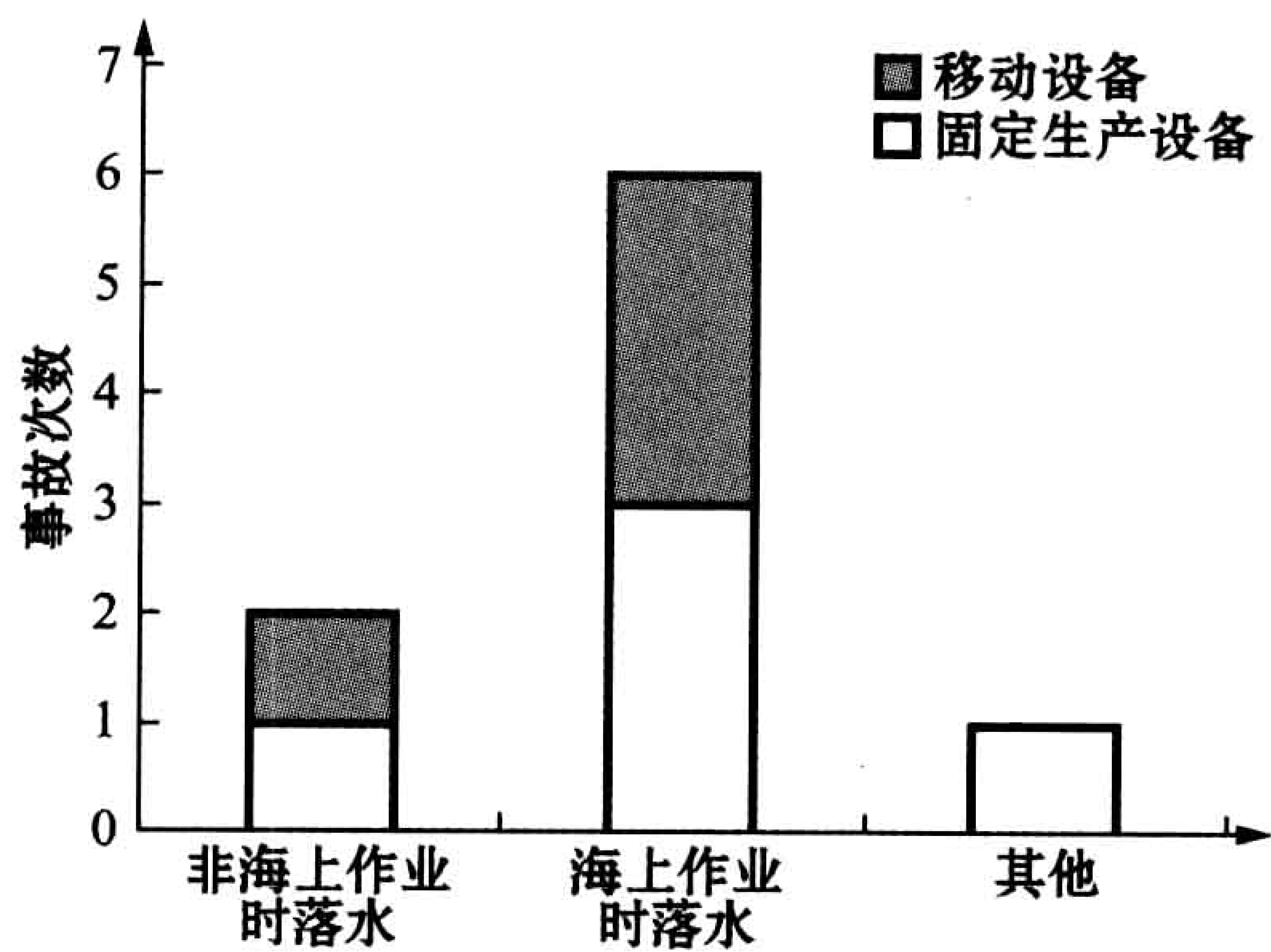


图 12.6　1990～2003 年间英国海域船员落水事故场景

12.4　直升机水上迫降事故 Helicopter Ditching Accidents

应急预案工作对于船员落水事故和直升机迫降事故具有重要意义。响应时间和救助能力是关键因素。根据挪威海域的施救要求，在海上设施附近区域内实施救助时，应当在直升机迫降后的 120min 内将机内所有人员救起。

采用搜救直升机是最有效的救助方式。因为只要直升机可以飞行，它就可以在任何气候条件下实施救助。在无风或者微风的天气条件下，应急救生艇也可以在海上设施附近区域实施救助。而子艇则效果更佳。

一些英国和挪威的公司规定，在搜救直升机无法使用的情况下，应当对恶劣天气中飞行的直升机实行管制。这是因为应急救生艇无法在恶劣的天气中实施救助。

如果我们考虑 1986～2005 年间挪威海域与直升机有关的事故和事件，那只在 1996 年发生过一次直升机迫降(即受控海上紧急降落)。而在 1997 年的另一起事故中，直升机高速冲向海面，机上人员无一生还。

直升机有时也会紧急降落在船舶、附近的海上设施以及陆地上。在 1999～2005 年的 7 年间，挪威海域上发生过 3 次紧急降落，降落地点为船舶或者附近的海上设施。这类事件也发生在设施密集和商船交通繁忙的北海上。而在挪威海域或是北仑支海，由于海上设施和来往商船较少，直升机更有可能紧急降落在海面上。

在英国已发生多起直升机事故，这些事故中为了救助幸存者，必须实施海上救助。

12.5　结构失效
Structural Failure

将结构失效的风险进行量化相当困难。在量化风险评估(QRA)研究中通常将其省略，但这使我们无法展现完整风险画面。因此，在评估风险后果时也应对结构失效引起的风险进行评估。同时我们必须承认，在确定降低风险的措施及其效果时，风险分析有可能并不适用。实践中，结构失效的风险主要源于以下 3 方面：

- 由于载荷和结构承载能力的变化造成结构失效的概率；
- 事故造成结构失效的概率；
- 结构设计、制造、安装和操作的重大过失造成失效的概率。

第一个方面即等同于结构体可靠性研究的一般范围。通过对特定载荷和阻力系数制定相应的设计标准可以控制这类风险。制定设计标准时应以低失效概率(即低于每年 10^{-4})为设计目标。因此,这个概率通常比其余两种失效概率更低。

事故造成的失效概率取决于系统性故障,例如压载系统故障、锚泊系统故障、碰撞冲击力、坠落物体等。这些机理在本书其他章节进行介绍。

因重大过失造成失效的概率是最难确定的,一方面是因为它超出了结构可靠性研究的范围,另一方面是因为无法利用常规风险分析方法对它进行分析。通常,为了使项目中重大过失的概率保持在较低水平,需要制定一个详细的方案用于鉴定和确保设计、制造和安装过程中各重要部件的质量。根据 Lotsberg et al.(2004),以下各项可视为重大过失:

- 工作人员未充分理解设计方法;
- 忽视信息;
- 错误,例如计算错误(包括分析程序的输入错误以及计算机设计软件错误);
- 缺乏自检和鉴定;
- 在制造等过程中缺乏对材料数据测试、焊接操作和检查的跟进;
- 因缺乏沟通或沟通不当而造成的错误;
- 未对海上设施工作人员进行充分培训,这可能造成压载系统操作不当;
- 海上设施运行系统错误。

由此可知,重大过失可以理解为人为错误。以上各项的共同特点是,它们都有可能被及时察觉并纠正。重大过失是造成结构失效的重要原因,因此,关注上述问题对于确保项目成功至关重要。Vinnem (2000)中记录了浮式生产储卸装置(FPSO)上的货物系统发生的一次重大操作过失。

图 11.1 引用了 Lotsberg et al. (2004)使用的方法,此方法有助于分析重大过失如何导致风险发生。

12.6 水下气体泄漏 Subsea Gas Release

水下气体泄漏可能来源于水下气井以及立管和管线。在此并不讨论水下原油泄漏问题。气柱的特殊之处是可能在海面上方形成可燃气体云。第 11.5 节讨论了浮动物体的浮力影响。

当泄漏速率较高时，在海面就可以观察到水下气体泄漏。而泄漏速率较低时，如果没有使用水下机器人，就很难观察并探测到泄漏是否发生。实际中可以观察以下相关参数：

- 海面上气柱的直径；
- 气柱区域内的海浪情况；
- 水流的水平速度。

水中气柱的上方可能形成气体云。气体泄漏的规模以及其他参数决定了气体云的浓度是否会高于爆炸下限。图 12.7 显示气柱和所形成气体云的理想形态。

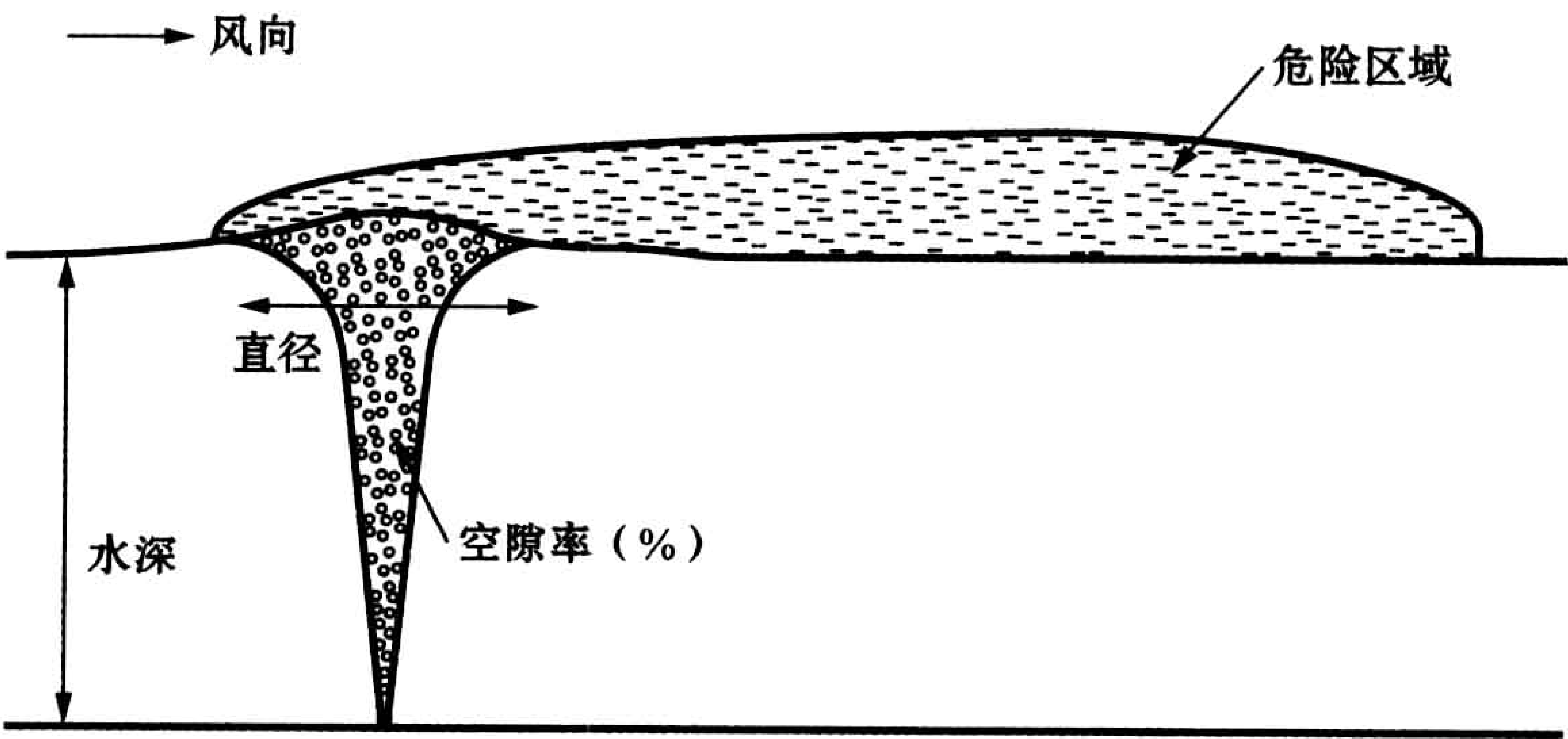


图 12.7　海面上观察到的水下气体泄漏情况

如果气体在水下 100m 处以 1 000kg/s 的速率发生泄漏，孔隙率可能达约 40%，水面可能因此上升最高 4m，气柱直径可能达约 250m。通常，以下因素将影响到泄漏气体的运动规律和形状：

- 泄漏速率(kg/s)；
- 气体密度(kg/Sm^3)；
- 泄漏深度；
- 泄漏开口直径；
- 泄漏方向；
- 水流；
- 垂直方向海水温度和盐度的变化。

如果区域内存在起火源，且水下气体泄漏形成的气体云浓度高于爆炸下限，就可能引起起火。最常见的起火源是驶入气体云的船舶。如果未设立安全区域，一艘过往船舶进入这个区域时可能并不知道存在气体云，或者在区域内进行应急响应行动。在第 4.9.1 节介绍的“左敦”油田管线破裂事故中，由于需要确定危险区域的范围，应急行动被迫推迟。在这次事件中，守备船观察到泄漏气柱直径约 100m，发生泄漏的地点位于水下 126m，气体泄漏速率起始为 25～30kg/s，之后下降到 3～5kg/s。

在“左敦”泄漏事故中，通过“左敦”号浮式生产储卸装置(FPSO)的气体输出管线压力效果发现了泄漏，守备船在跟踪管线寻找泄漏时检测到了泄漏地点。

Fanneløp(1994)是对水中气柱进行建模的重要数据来源。在确定气柱运动规律后，利用计算流体力学(CFD)对海面上方的气体云的活动规律和危险区域的范围进行建模。

危险区域的扩展与风速有着紧密的联系。当泄漏速率为 1 000kg/s 时，如果风速较低，海面危险区域通常会沿风向延伸 200～300m，而风速中等时(8～10 m/s)，海面危险区域通常会沿风向延伸 1000m 或更远。危险区域将包括海面上方 30～40m 的范围。

第 13 章　基于风险设计的方法

Approach to Risk Based Design

13.1 概述 Overview

13.1.1 关于基于风险设计的需求 About the Need for Risk Based Design

近几年来，基于风险的设计已经成为人们关注的焦点。不管是同意还是反对，它似乎被人们像对宗教一样地看待。那些赞同这种概念的人主要是石油公司的代表。承包商们根据他们的合同是如何表述的来表示同意或者反对，这是完全可以理解的。有时候机构显现出反对这种方法的态度，至少是在实际中要实施它的时候。而另一方面，法规已相当广泛地参照了这种方法。

基于风险的设计的想法是根据现实存在的危险和风险来挑选和设计防护和缓解措施的，而不是应用确定的由机构的要求、标准或是以前的项目所给出的设计解决方案。

到目前为止一切顺利，但是要普遍适应这种方法似乎仅仅是一个缓慢发生的事情。令人惊讶的是石油公司对此方法的热情以及它所带来的潜力，尤其是在成本边际收益持续处于压力之下的形势中。

那么关于基于风险的设计方法的问题是什么呢？为什么它没有更广泛的应用呢？

- 我们不相信在此基础上挑选的设计解决方案吗？
- 我们不相信风险分析是一种工具吗？
- 难道是数据不够好？
- 我们不相信应用该方法的风险评估员吗？

这些问题将是本章讨论的重点，本章就一般情况下基于风险的方法和它对主要风险类型的应用作出讨论。

- 火灾；
- 爆炸；
- 碰撞冲击；
- 坠落载荷的冲击。

作为基于风险的设计方法的进一步说明，可以就一些关于爆炸载荷的设计作出评论。约 10 年前采用的方法具备以下特征：

- 定义爆炸的最差情况条件；
- 使用基于实验数据或者计算流体力学（CFD）的方法来模拟或计算最坏情况下的爆炸载荷；
- 建立和实施最坏情况条件下的设计解决方案。

设计解决方案在这些条件下能以一种成本效益的方式来实施，因此没有人认识到对一种更为先进的方法的需求。不管怎样，在量化风险评估的研究中，爆炸载荷分布的简单概率评估是要做的。

在 1998 年和 1999 年间，关于针对爆炸载荷的设计的形势发生了显著变化。这是紧随着在英国 Gas Spade Adam 测试中心就顶边结构爆炸冲击与消防工程（BFETS）测试计划完成大规模测试计划后发生的（SCI，1998）。源自这些测试的结果启示如下：

- 最坏情况条件下作出设计是不可能的，或者如果可能，那么出于对成本明智的考量它也变得不可能了；
- 需要一些替代方法；
- 概率方法已经成为一项工业标准；
- 挪威的石油公司如挪威海德鲁公司、挪威国家石油公司和萨迦石油公司开发了一种广泛的方法，即爆炸冲击载荷的概率建模。随着在 1998 年提出以后，其程序已得到进一步的开发。

因此，对于爆炸来说，问题不是谁想采用概率方法，而是谁能承担得起不这样做的后果。

13.1.2 基于风险设计的范围 Scope for Risk Based Design

基于风险的设计与用于结构和顶边区域的正常离岸设计惯例是一致的。正如下面要讨论的一样，在这两个领域里的监管要求是有区别的。考虑应用基于风险设计方法的系统和设备请详见表 13.1。

在本章后续的部分中，将根据表 13.1 中的 3 个类别提及 3 个不同的研究级别。虽然以前只是根据专门的结构设计标准进行设计，但是结构系统和被动安全系统的设计本质上是一种结构设计。表 13.1 中的另一类别牵涉到安全和应急系统或在安全领域极其重要的系统。

表 13.1 基于风险设计的范围概述

结构系统	主动安全和应急系统	被动安全系统
支撑结构 船体结构 甲板结构 浮力 隔舱 水下设施	气体探测 火灾探测 应急切断(ESD)阀 生产安全阀 生产安全仪表 灭火用水供给 浸水系统 喷洒系统 通风系统	被动火灾防护 爆炸冲击波防护 顶边系统的坠落载荷防护

13.1.3 设计所面临的挑战 Challenges for Design

在一些方面也许会对基于风险的设计提出挑战，这或许是因为典型的解决方案太过昂贵，或许是因为关于分析结果存在相当大的不确定性。这个题目自身就是有争议的，本质上就是一个问题。以下简短地分开列出两个内容："标准装备"和"最低装备"。

13.1.3.1 标准装备 Standard Installations

这个术语包含了带固定人员配备的整合设施(或是联动桥楼)。要考虑固定平台和各种不同类型的浮式生产平台。

设计所面临的挑战可能与设计意外载荷和前提的重要性相关。有经验表明,这对下述内容尤显重要:

- 被动结构消防
  - 特别适用于海上火灾,但也适用于顶边设备的防护;
- 针对爆炸冲击载荷的设计:
  - 爆炸冲击波和火灾屏障;
  - 设备防爆炸冲击波;
  - 结构防爆炸冲击波;
- 针对碰撞冲击的计算:
  - 尤其是钢铁平台;
  - 浮式混凝土结构;
  - 还有其他的海上浮式设施,如果在破损条件下甲板结构内未形成储备浮力的话;
- 针对坠落物体冲击的计算:
  - 尤其是浮力元素;
  - 张力腿平台(TLP)的特殊临界性,如果不为牵索的动力失效或隔舱的充填进行设计的话。

就浮式生产储卸装置(FPSO)而言,虽然与寓意着局部破损之外的场景无关,但穿梭油船带来的冲击频率已经相当高。这是在第 11.4 节中仍要讨论的一个重要议题。

13.1.3.2 最低装备 Minimum Installations

这些海上设施主要是“非一般人工操纵”平台。实际上它们毫无例外都是一些海上固定设施,即具有或不具有最低加工水平的典型井口平台。

然而，平台的规模和所安装系统的范围变化显著。有时候移动式钻井平台与其他海上设施相结合，这样就一起形成了一个生产平台。我们已经选定将这样的组合称为“标准”海上设施，即使每种装备都可以被单独地看作是“最低装备”的。

对标准装备而言可能是重要的各个方面也都适用于最低装备，而且在许多情况下其重要性更甚。另外，其他方面也显关键，例如：

- 主动安全与应急系统的使用范围；
- 主动安全系统的可用性要求；
- 最低装备结构针对外部冲击的防护。

13.1.3.3 作业安全所面临的挑战 Challenges for Operational Safety

在某些情况下，应用浮式生产海上设施带来了新的危险，需要特别予以关注，因为它们发生在作业与设计之间的边缘地带。应用海上控制设施的主动系统就是这样一个方面。

最显而易见的既往例子是一起涉及设计解决方案的严重事故，该方案严重依赖于操作控制。这起事故于 1982 年发生在加拿大水域的“海洋突击者”号上。“海洋突击者”号在其立柱之一内部的压载控制室设有一舷窗，暴风雨期间发生破碎。海水的进入引起压载控制系统发生短路，由此导致压载阀失控。

操作员没能迅即矫正当时的形势，而且信以为自己已经关闭了阀门，但实际上此时的阀门已被打开。倾斜角因此加大，不久倾斜发展到钻井平台无法恢复至正确位置的程度。不幸的设计细节是仅在浮箱的一端有压载泵。这样的结果致使在某些倾斜的条件下泵的吸头不能排空某些舱位。第 4.12.5 节已给出了这些事件的概要。应当注意到的是，人们因此失去了钻井平台上的一切。

设计和操作之间互动的另一个例子是在某些浮式生产储卸装置(FPSO)设计中的转塔现有布置。回转布置应用的是一个复杂的回转/锁紧系统，对其进行主动手动控制是必需的。在不同位置的两批人之间不会有相同的信息，这就使得在他们之间作广泛的协调是必不可少的。

13.2　权威规范和要求
Authority Regulations and Requirements

13.2.1　挪威海上设施
Norwegian Installations

13.2.1.1　计算意外事件
Dimensioning Accidental Events

自 1990 年以来,挪威离岸规范已经包含了对结构以及设备进行基于风险设计的条款。在以前的规范里,基本事件被称作"计算意外事件",根据风险分析规范(NPD, 1990)其被定义如下:

- 计算意外事件　　根据已定义的接受准则,意外事件是一种不可接受的风险,所以它充当了海上设施设计和操作的基础,否则就是实施活动的基础。

自从这个定义推广以后就在行业里带来了问题,而且挪威石油标准化组织(NORSOK)的风险和应急预案指导准则(NORSOK, 2001)已阐述了一个替代定义。在经修订的定义中,计算意外载荷是关键定义,而计算意外事件的定义则紧随其后。

- 计算意外载荷　　足以满足 RAC 的载荷(行动);
- 计算意外事件　　为了满足已定义的 RAC,意外事件是海上设施的布局、计算和应用以及整体活动的基础。

原始的定义有两个主要问题,第一个明显是指"不可接受风险"。如果风险等级正如在概念阶段所评估的一样是可接受的,那么这意味着什么呢?这是否

暗示着没有意外事件作为设计的基础呢？可能没有，但没有清楚的回答。第二个问题涉及“不可接受风险”措辞的诠释。

除了“意外行动”和“意外限制状态”之外，挪威石油标准化组织（NORSOK）的结构设计标准 NORSOK N-001、N-003 和 N-004（NORSOK，2004a；1999a，2004b）并不涉及任何事情。

设施规范（PSA，2002c）定义“计算意外载荷”如下：“意外载荷即设施或一项功能在一个必需的时间段内能够经受得住的”。并没有说明这些载荷将如何确定。

13.2.1.2 计算意外载荷的应用 Use of Dimensioning Accidental Loads

规范仍提及“计算火灾和爆炸载荷”的措辞和出于各种不同的设计意图而对风险分析的应用，诸如以下实例：

- 被动消防的设计；
- 隔火设计；
- 关于通信设备的决定；
- 急性环境污染的应对；
- 守备船的使用；
- 选择在紧急情况下保护人员的救生服；
- 详细说明紧急情况下用于人员处理的应急单元；
- 使用用于应急预案的化学药品。

应注意其他的一个方面。就规范本身而言，在有些方面规定了最低的或确定性的解决方案，它们不因任何类型的分析有所改变。此类最低要求的例子是：

- 设计被动消防时，需要无视主动消防系统提供的冷却效应；
- 需要把消防用水提供到最大的区域及其最大的邻近区域；
- 需要提供具有足够容量的自由降落式救生艇。

13.2.1.3　结构设计 Structural Design

根据 NORSOK N-001（NORSOK，2004a），结构设计要求进行意外限制状态的设计检查，由以下各部分组成：

- 阻止意外行动。应进行结构检查，以维持符合已定义的意外行动的既定负载功能。
- 破损条件下的抵抗力。除了可能在(a)项下已经说明过的局部破损，或者更明确定义的局部破损之外，结构需继续抵抗已定义的环境条件，而没有遭遇到全面失效、自由漂移、倾覆、沉没或对外部环境来说大范围的破损。

为了确定什么是意外行动，该方法又指向风险分析。

13.2.2　英国规范 UK Regulations

第 1.6 节给出了英国规范的简要概述。应该注意到，为了定义计算意外载荷，英国规范不会有类似的应用风险分析的要求。

13.3　与风险分析的关系 Relationship with Risk Analysis

基于风险的设计方法与风险分析明显有着紧密的关系。这是显而易见的，在一般意义上不会引起争议，但是当在细节上考虑如何实施时就成了问题。

本章节讨论对顶边系统和设备进行基于风险的设计时应用风险分析的议题。有些方面需要予以澄清：

- 哪种类型的风险分析是最合适的?
- 如何在事件树中选择计算意外事件?
- 在事件树中建模时什么是重要的方面?
- 什么类型的后果模型用于风险分析?
- 风险分析对安全系统中的变化足够敏感吗?

13.3.1 适当的风险分析 Suitable Risk Analysis

风险分析所适用的要求在确定什么是合适的风险接受准则的过程中也有含义。这样的讨论将涵盖准则和分析类型两者,因为两者颇为紧密相关。这些话题明显取决于在风险分析中所要处理的系统或要素的类型。

13.3.1.1 结构系统 Structural Systems

在挪威法规的架构下,必须依照相关规范所规定的方法来设计结构系统。在规范中说明可接受的限度,定义有关结构后果的功能要求和超标频率的上限(每年每载荷类型为 10^{-4})。最大后果的陈述和发生频率二者与结构方面清晰相关,如下:

- 后果:在破损条件下结构系统的功能容量;
- 频率:结构中意外载荷的发生频率。

这表示后果分析不应过度,因而单独考虑结构方面就已足够。这限制了进行广泛后果分析的需要,并意味着不确定性将受到限制,如在第 2.4.3 节中所讨论的一样。

13.3.1.2 被动安全系统 Passive Safety Systems

被动安全系统在某种程度上与上文所考虑的结构事件密切相关,因为这些系统的计算内容通常涉及载荷规格,例如:

- 被动消防的热载荷容量
- 防护爆炸冲击波的爆炸冲击载荷容量；
- 防止坠落载荷的冲击载荷容量。

这就确定了用于此范畴的风险接受准则和风险分析的类型。它们尽可能多地类似于结构系统的准则和方法。设施规范（PSA，2002c）已经定义了类似于结构系统的防止事态加剧的要求。这一类型的准则常常是指“事态加剧准则”，意即被动屏障的功能常常用于防止从一个区域到邻近区域的事态加剧。

考虑到后果建模的范围有限和不确定性的程度降低，注明适用于结构设计方法的优点也适用于被动屏障的设计。

13.3.1.3　主动安全和应急系统 Active Safety and Emergency Systems

关于基于风险的设计，主动安全系统是最难应对的，因为需要处理的方面尤显多样化。表 13.2 尝试通过列出一些对此类系统至关重要的设计参数来展现与此相关的方方面面。

表 13.2　用于设计主动安全系统的参数概览

系　统	参　数	系　统	参　数
气体探测	探测器类型	消防给水	泵的数量
	探测器定位		泵的类型
	探测逻辑		供电可靠性
	探测可操作性		可用性
	测试间隔时间		相对于作业系统的独立性
火灾探测	探测器类型	消防用水分配	供给管线路径
	探测器定位		冗余
	探测逻辑		分段式
	探测可操作性		检查和测试间隔时间
	测试间隔时间		

（续表）

系　统	参　数	系　统	参　数
应急切断阀	阀门定位	浸水系统	阀门定位
	分段处理		分段处理
	阀门类型		浸水头定位
	关闭时间		可操作性
	可操作性		测试间隔时间
	消防		
生产安全阀	阀门定位	喷淋系统	阀门定位
	分段处理		分段处理
	阀门类型		浸水头定位
	关闭时间		可用性
	减压时间		
	消防		
生产安全测试设备	需要其他仪器	通风系统	自然通风/机械系统
			管道定位
			独立系统
			可用性

这些参数的多样性意味着没有一种全能的分析类型特别适合于所有的这些用途。还应考虑到这些参数中的哪一些实际上是适合基于风险的设计的。

可用性是一个参数，它通常明确地被包含在用于研究的事件树中。因此，表 13.2 中关于系统涉及可用性的各方面是基于风险设计中最显而易见的候选项，包括以下内容：

- 气体探测；
- 火灾探测；
- 应急切断阀；
- 消防给水；
- 浸水系统；
- 喷淋系统；

● 通风系统。

有人可能会认为，可用性仅仅是一个参数而已，它无非适用于与主动安全系统相关的基于风险的设计。然而，对生产流量分段处理的需求也可以在基于风险的范畴内处理。测试安全系统的要求也可以借助于源自基于风险设计的输入数据来确定。

其他参数如阀门类型、不同设备的定位等，都不可能在基于风险方法的范畴内进行处理。这并不是研究对这些内容的变化是否足够敏感的问题，而是事实的存在即当前的风险建模不能以有意义的方式来处理这些方面。

关于这些系统的分析是用来做什么的？这个问题也需要作出说明。源自分析的结果在许多情况中将被用于识别设计前提，而不是设计载荷。

只要风险结果可以被分类成不同场景和严重性类别，那么就会使用数种类型的风险分析和风险接受准则。进一步说，风险需要以连续的尺度进行量化，它反映出事故频率和后果的变化。这意味着可以应用死亡事故风险、损害风险和事态加剧风险等参数。

13.3.2 事件树的应用 Use of Event Trees

13.3.2.1 主动安全系统的设计 Design of Active Safety Systems

事件树多数都用于主动安全系统的基于风险设计的分析之中，那么问题是应当使用相对粗糙的事件树还是更加详细的事件树呢。

如果考虑图 6.10 中所示的简单事件树，那么将会看到它包含以下方面的内容：

● 隔离段的应急切断系统；
● 起火；
● 强烈爆炸；
● 事态加剧影响到其他设备和区域。

这对系统是一个相当有限的挑选。简单的事件树主要是针对在人员风险中占支配地位的各方面。因此，有一棵简单的事件树就能防御人员风险了，但是这种树的结构意味着不会处理以下的系统：

- 气体探测；
- 火灾(火焰/热量/烟雾)探测；
- 消防给水；
- 浸水系统；
- 喷淋系统；
- 通风系统。

因此，为了应用风险分析来选择主动安全系统的设计前提，需要一棵复杂的事件树。如第 6 章图 6.12 和图 6.13 所示的树结构应该是较为合适的。

以下列出了在某一设计环境下规划风险分析研究时需要仔细思考的各类问题：

- 管系内/外流量的释放率(应视为时变函数)，有/无不受限制的流动，等；
- 气体泄漏几何，即方向、障碍物等；
- 计算可燃云的大小，作为计算起火概率和爆炸过压的基础；
- 排水系统的性能，以便限制池火的持续时间；
- 可能的起火源，它们的时间关联性、强度等；
- 会引起火灾与爆炸的起火之间的区别；
- 估计气体爆炸过压；
- 计算替代场景的火灾大小和在人员陷于困境或安全功能遭受损害这个关键节点上的辐射冲击。
- 计算在人员陷于困境或安全功能遭受损害这个关键节点上的烟雾冲击。

一些挪威石油公司已经通过合作建立起安全系统可用性的目标值。

13.3.2.2 结构和被动安全系统的设计 Design of Structures and Passive Safety Systems

所用事件树类型的选择主要是由对后果模型的选择来确定的，正如下面要

讨论的一样。详尽的后果模型会要求有详细的事件树，但是如果挑选了粗糙的后果模型，那么更粗糙的事件树也是可以使用的。

事件树通常会不同于涉及主动安全系统时所要求的那些内容。

13.3.3　后果模型的应用 Use of Consequence Models

是否应该应用粗糙的或复杂的后果模型？这个问题适用于结构和被动安全系统抵抗意外载荷的设计。这看似一种轻而易举的选择，因为明显应该应用复杂的后果模型，但让人进退两难的是什么时候应用这些模型。可用的选项如下：

- 在风险分析中应用复杂的后果模型。此法是指：
  - 将所有复杂的后果模型整合进风险分析之中；
  - 将设计意外载荷直接从分析中提取出来。
- 设计时使用复杂的后果模型。此法是指：
  - 使用“重要性次序”后果模型进行风险分析。
  - 在此基础上完成对初步的设计意外载荷(DAL)和设计意外事件(DAE)的挑选；
  - 为了确认或修订初步的设计意外载荷，对结构和/或被动防护的设计进行高级后果建模。

火灾和爆炸二者都是复杂的物理过程，最好需要复杂的建模。但是由于在此概述的实际限制，这变成了一件进退两难的事情，而没有任何明显的解决方案。这在下表中有所说明。表 13.3 非常清楚地说明，火灾载荷的建模比爆炸和碰撞的建模复杂得多。

表 13.3　火灾、爆炸和碰撞载荷的特征比较

	火　灾	爆　炸	碰　撞
特征	热载荷 持续时间 起伏变动 方向 对不同要素的易感度	峰值过压 冲击力	冲击能量 (冲击能量)

还须指出的是，粗糙建模通常更保守，因此允许比起最低要求有更多的余量。这意味着，粗糙建模在设计中更具鲁棒性，这是一个优势。

应用复杂后果建模的首选解决方案是上面列出的第二选项，即在进行设计时就应用复杂后果模型。这有以下好处：

- 采用可快速执行的后果模型进行风险分析；
- 避免了将高级后果模型整合进风险分析的需要，而风险分析在需要许多场景时就成了问题。如果应用高级后果模型，这些场景可能要求很广泛的资源和时间。
- 高级后果建模可以局限于那些作为设计意外事件而挑选的场景。

即使这个选项在实践中是最易执行的，但可能存在从概率意义上来说是如此复杂的现象，以至于仅有的防御选项就是选择第一选项，即将高级后果建模整合进风险分析之中。

13.3.4　对主动安全系统中变化的敏感性 Sensitivity to Changes in Active Safety Systems

在 Vinnem et al. (1996a)中所考虑的敏感性就是相对于事件树中的节点而降低下列失效概率(即安全改进)：

- 泄漏探测；
- 操作员干预；
- 热加工工时；
- 最大可能过压；
- 火灾探测；
- 小火灾的人工扑救；
- 应急切断操作；
- 消防给水无效；
- 附近设备引起的事态加剧；
- 结构崩溃时间。

热加工工时数量的减少意味着起火概率的降低，而最大爆炸过压的降低则意味着强爆炸概率的降低。应该注意到，放空系统也是本研究的一部分，但在图表中却被排除了。

图 13.1 所示为源自所进行的敏感性研究的总体结果。放空敏感性对人员风险并没有影响，且是一个非显著影响，其数值为平台总损失的频率降低少于 2%，这是最大的影响了。

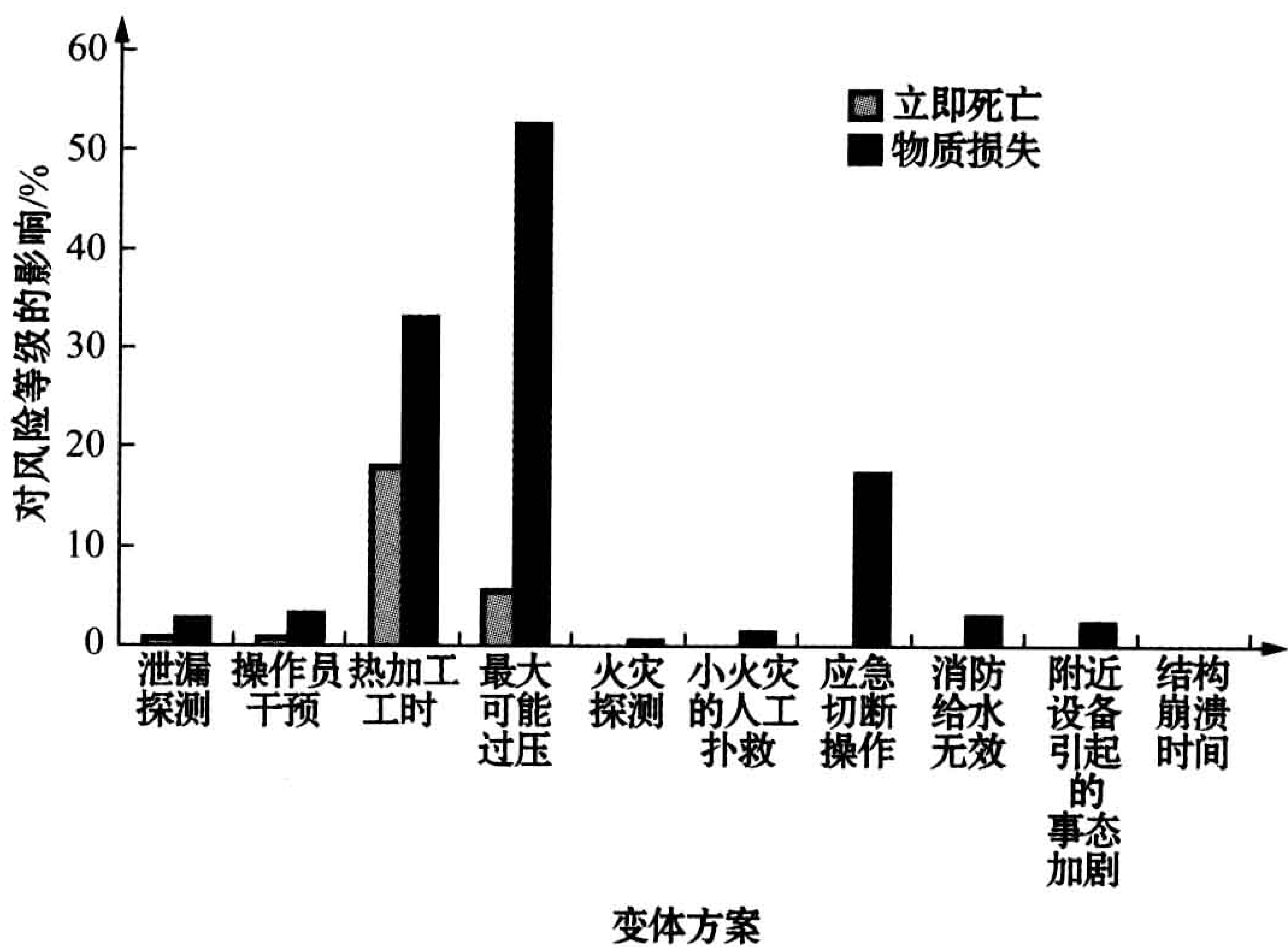


图 13.1　总体敏感性结果

应该注意到，除了热加工和结构失效时间之外，所有的敏感性都是以失效概率降低 50% 为基础的。热加工持续时间降低 90%，结构失效时间就会从 30min 降低到 20min（即风险增大了）。

可能会成疑问的是，即失效概率降低 50% 是否就是一种代表性改进，或者大多数系统所显示的非敏感性是否因为每个参数的改进太少。选择失效概率降低 50%，是因为对现存系统进行有限升级一般就可以完成了，而无需安装额外的冗余。通过改变维护、检测或测试程序或间隔时间可以完成这样的改进。这确实是对现有海上设施作出可能改进的主要范围。

为了证明可用性的更广泛变化所造成的影响，后续进行了另外一组敏感性研究。这些后续研究确认了在最初进行的总体研究中所得出的结果。

13.4 顶边系统基于风险设计的方法 Approach to Risk Based Design of Topside Systems

13.4.1 方法的基础 Basis for Approach

在搜寻一种可能对所述目的足够敏感的方法期间所出现的情况，如图 13.2 所示。该图显示了在生产系统中不同泄漏类别引起的死亡风险比重(对潜在人命丧失)。

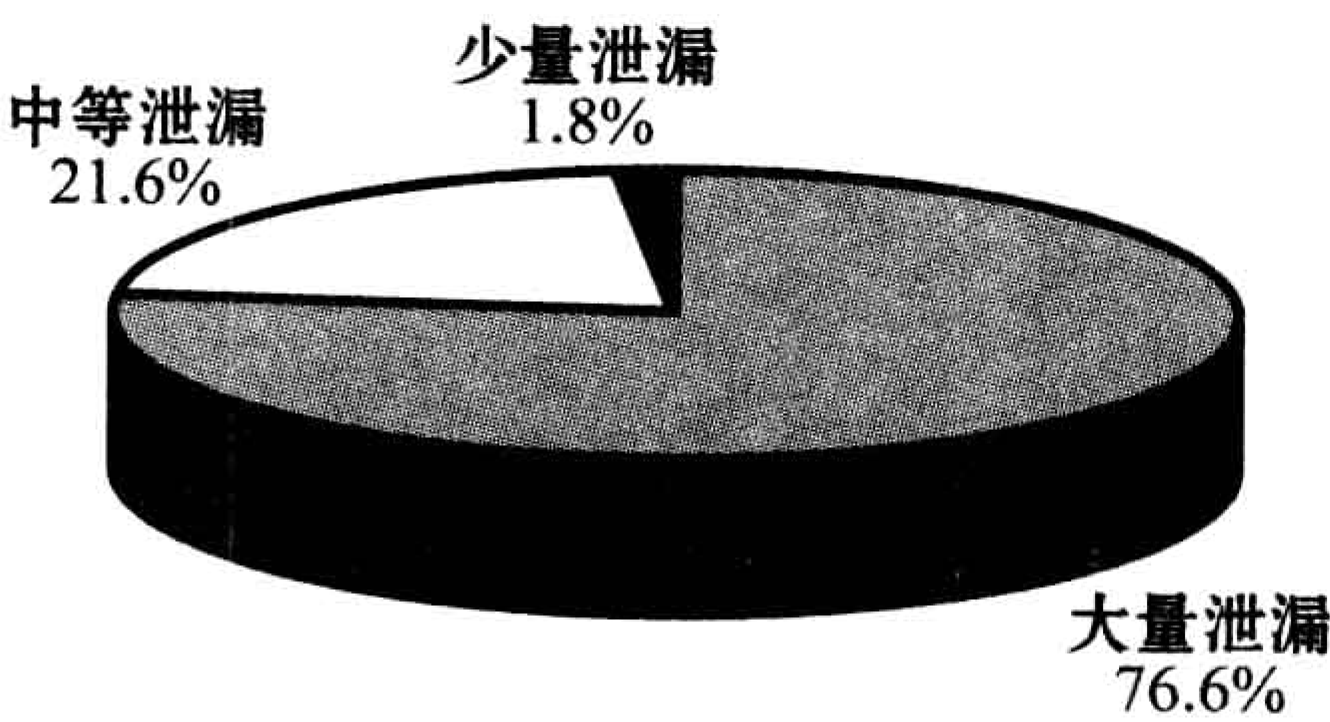


图 13.2 生产系统泄漏类别引起的死亡风险比重

量化风险评估的结果看似对安全系统标准、性能和功能的变体方案不敏感的原因之一就是，生产系统风险的主要部分常常是由中等和大量气体和液体泄漏所构成。安全系统和功能在防护这些泄漏时效率低下，这是因为所处条件对需要完全起作用的系统来说通常太过极端。

另一方面，安全系统也许无需有能力处理这些较大量的泄漏事宜，因为这样的泄漏相对很少发生。对于参照平台，中等或大量泄漏起火的预期频率是：

每平台年为 0.007

如果这被采用，那么安全系统和功能的设计基础应仅限于少量泄漏，这样的泄漏显然更加频繁。那么这些系统和功能的重要性预期会占据更加主导的地位。图 13.3 显示了 3 种泄漏规格在 3 个不同场景中的频率表现：

- 起火和未起火泄漏；
- 仅为起火泄漏；
- 重大物质损失风险。

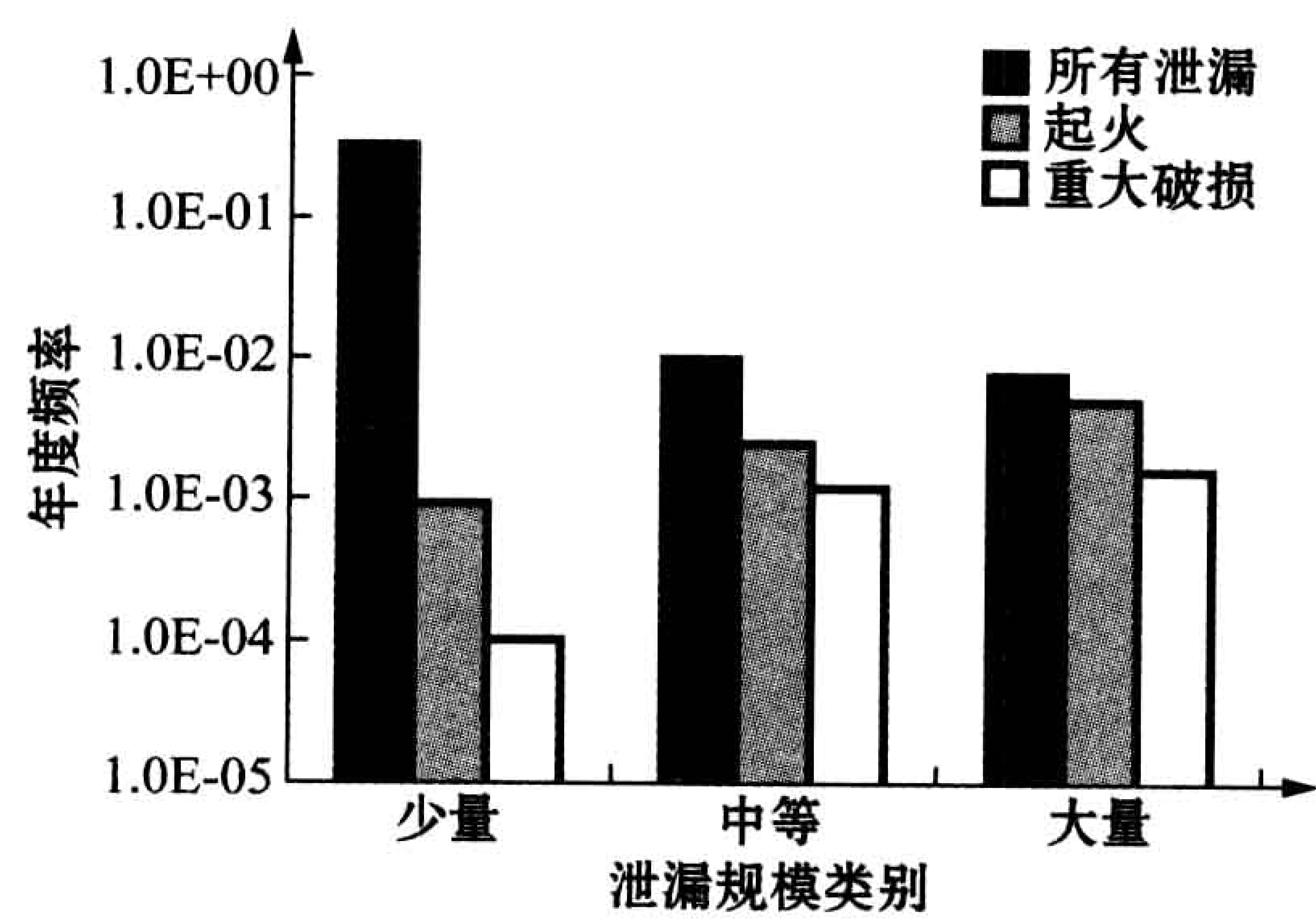


图 13.3　少量泄漏频率、起火泄漏、重大物质损失频率图示

应该注意到，所建议的方法应对了主管机构经常表示的担心，即时常只考虑总风险，且局部变体方案被“排除”。确实必须考虑这里提议的方法，这是为了考量“局部影响”。

图 13.3 所示为少量泄漏的数值最高，但是在风险中的比重最低（正如所预期的一样）。如图所示，考虑到了泄漏所导致的重大物质损失的条件概率。对于少量泄漏，该值是 0.03%，而大量泄漏则是 20%。

安全系统在防止少量泄漏产生影响方面可能是重要的，这种可能性将在下文做详细考虑。

13.4.2　建议方法的基本内容 Fundamentals of Proposed Approach

所建议的方法可表述如下：

- 分别计算源自少量油气泄漏的风险；
- 把所处场景分成下列子类别：
  - 强烈爆炸；
  - 火灾在外部区域扩散(即平台上事态加剧)；
  - 火灾在内部区域扩散；
  - 火灾不扩散；
- 以此作为安全系统和功能的敏感性研究的基础；
- 确定关于少量泄漏风险最小化的安全系统和功能的最佳配置和基本设计理念；
- 在涉及风险优化的非常特殊的境况下，只考虑安全系统和功能(例如个别设备的定位)更为细致的细节。

最佳配置和设计理念的确定要求相关准则对这种优化是可用的。可能引起争论的是，确立目标水平超出了本书的范围，但本章的稍后部分会呈现所建议的方法。

13.4.3 敏感性概述
Overview of Sensitivities

本节总结了不同的安全系统和功能的各个敏感性。仅仅是一个概述，主要的系统和功能将在下文分别讨论。

当讨论各个系统和功能的敏感性的时候，就会使用一个被称为相对敏感性的参数。安全系统的相对敏感性计算如下：

$$S_{rel} = \frac{\text{场景频率的变化}}{\text{安全系统参数无效的变化}} \tag{13.1}$$

式中：

S_{rel}——某一系统或功能的相对敏感性。

图 13.4 根据上述定义给出了相对敏感性的概述，意即相对敏感性 1.0 相当于这样一种情况，即某一特定参数值降低 50％导致涉及少量泄漏的风险值降

低 50%。

由于敏感性的定义，爆炸过压的相对敏感性超过 1.0。该定义在某种程度上显得不直截了当，正如 Vinnem (1997a)所进一步阐述的那样。

有一个例外，即所有这些参数都可以被贴上安全系统或功能的标签，它们的相对敏感性均接近或高于 0.5，也就是说，某一特定参数值降低 50%引起与少量泄漏相关的风险降低至少 25%。

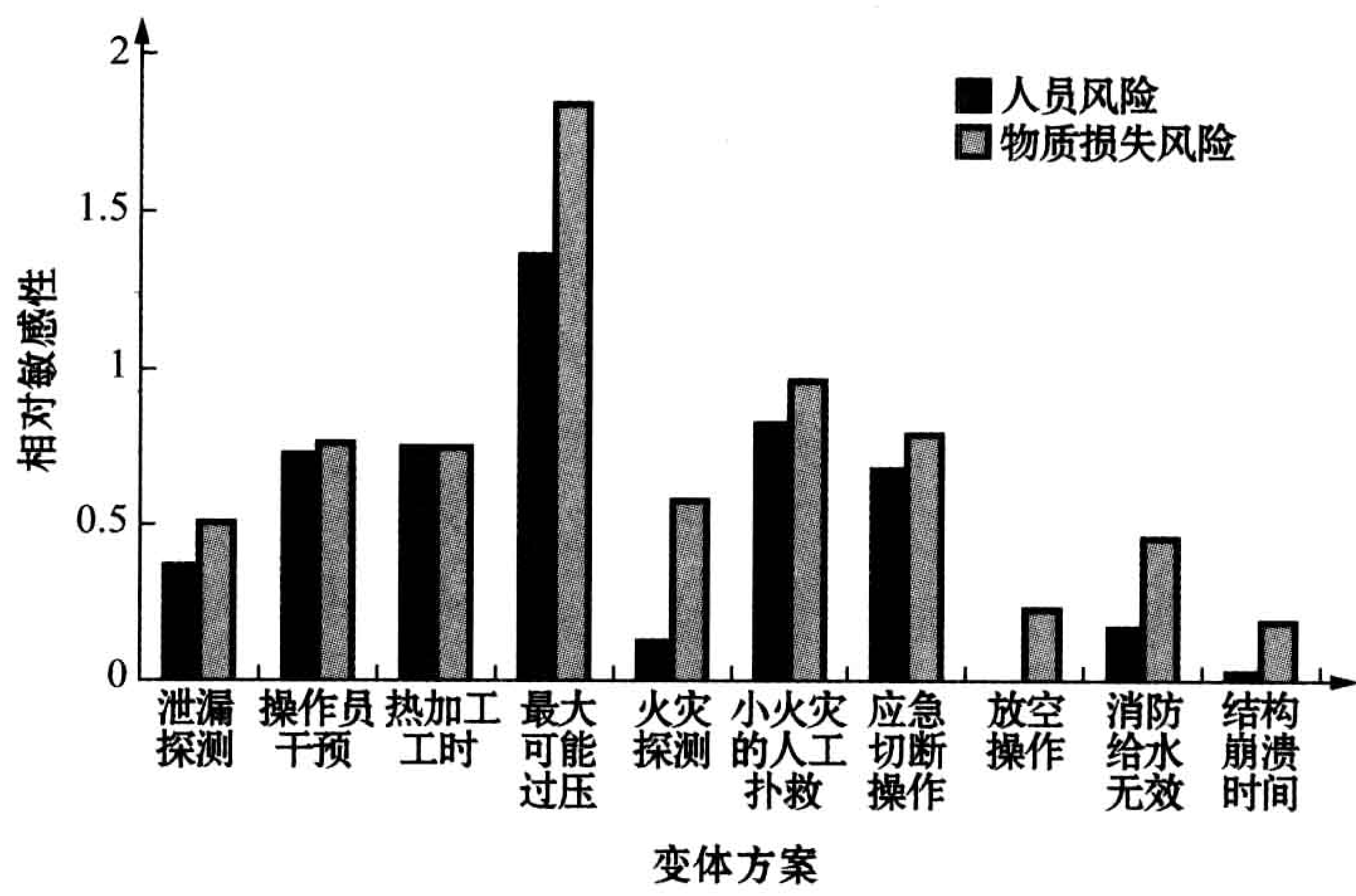


图 13.4　人员风险和物质损失风险的相对敏感性概述

13.4.4　什么应成为目标保护等级 What Should be the Target Protection Level

已经得到证明的是，如果谨慎计划和执行，风险分析可以被用作安全系统和功能的设计和作业规划的基础。对应急预案系统的设计也能得出类似的结论。下一个问题是如何确立起这些系统的可用性要求。

以下提议一种循序渐进的方法，即以评价总风险能否可用开始。这将是个罕见的案例。解决方案是把微量泄漏用作确立要求的基础，同时达到总风险在事实上是不发生变化的，而不管选择什么样的数值。

选择少量泄漏时，应该认识到，每个平台每年所预期的泄漏数通常是每年 0.1～1 的级别。因而失控的条件概率必须相当低。现在，这样一个场景的起火

概率通常很低,比如说最大是 1%。所以少量起火泄漏的年度总频率应低于0.01每年每平台。所建议的方法是:

1) 首先检查总风险究竟对安全系统的一些或所有可用性的变体方案是否足够敏感。如果情况属实,那么就绕过第 2 步和第 3 步,可以在完成最低合理可行原则(ALARP)评价之后选择可容忍风险的可用性。

2) 如果总风险对安全系统的可用性变体方案不够敏感,那么就要完全改变源自少量泄漏的风险比重,并计算在以下场景中对风险的相对比重:

- 强烈爆炸;
- 火灾在外部区域扩散(即在平台上);
- 火灾在内部区域扩散;
- 火灾不扩散;

3) 对于少量泄漏应有一个非显著总体概率,就是指这样的泄漏会发展成一场不可控制的火灾,它会超出它所起源的系统而使事态加剧。例如,总控制概率 0.99(或失控概率 1%)可用做确定不同安全系统所要求的可用性的基础。

采用建议值的含义是,由于少量气体泄漏而引起的不可控火灾的频率约为每年 10^{-4},类似于图 13.3 所示的数值,因而并非不合理。

将失控火灾用作确立可用性的数值基础的替代方案就是可以采用缘于少量泄漏的火灾(在火灾区域之外出现事态加剧)与此类所有泄漏规模火灾的总数之比值。其目标可以是这样的,即少量泄漏占此类火灾的比重并不显著,比值为 1∶100 或更低。

应该观察到,所建议的方法与风险接受准则没有密切关系,但方法的创建是在某种程度上进行的,这意味着总风险结果不会受到显著影响。

13.5 结构与被动安全系统基于风险的设计 Risk Based Design of Structural and Passive Safety Systems

结构系统与被动安全系统基于风险的设计比顶边系统基于风险的设计更

为容易。有一些关键的议题涉及其中：

- 对涉及设计意外载荷的优化在某些情况下是可能的。第 9.6 节中就有一个简单的例子；
- 在确定某一海上设施上不同区域的爆炸载荷概率分布时所使用的详尽分析非常关键。这也将在第 9.4 节中予以讨论。

13.6　实践思考 Practical Considerations

13.6.1　针对火灾载荷的设计 Design Against Fire Loads

针对火灾载荷的设计意味着需要对平台上包括碳氢化合物在内的所有相关系统进行分析。这包括 3 种主要的泄漏:井喷、立管泄漏和生产泄漏。为了指出需要考虑的重要方面,下文将分别讨论这些区域。应该注意到,这里并不处理涉及可能的溢出影响的井喷,只涉及它们对人员和/或海上设施本身的影响。

13.6.1.1　井喷分析 Analysis of Blowout

如果在海上设施上(即最固定的海上设施)或者直接在海上设施下面设有井口,那么井喷就是火灾风险的主要源头之一。第二种情况是指某些浮式设施,但不是多数。当配备半潜式浮式生产设施以进行自身的油井钻探和其他作业时,井口事实上就在海上设施的下面。在大多数浮式生产的案例中,油气井是有些距离的,井喷危险与浮式生产平台(FPU)的风险无关。

环境影响与控制井喷所需时间息息相关。这并不如对人员和结构的影响那么重要,因为井喷事实上无论如何有一段较长的持续时间。在某一环境内的一次短时间井喷所持续的时间约为几个小时而已(相对于天或周),而一次起火

井喷如果持续数小时,那么对人员或结构会是灾难性的。

以火灾大小和载荷的形式表现的井喷后果非常明显地取决于源自油层的不可控流量。事情经常是这样的,即用以预测井喷场景中流量的假设是相当的保守。可能需要在分析这些场景时对特定情况之间进行更多的区分并考虑下列方面:

- 在不受限与受限流量之间加以区分;
- 区分是流经管系还是套管;
- 将预期的油井流动潜力确定为时间函数。

关于井喷,消防的设计基础是在有序和安全逃生所需的时间内保护人员,而且如果有需要,展开随后的撤离工作。设计如此广泛的消防功能,以至于结构可以经历一次起火井喷而续存一段时间,这是不现实的。如果井喷持续一段较长时间,那么为提供所需程度的结构完整性,一般需要进行外部冷却处理。

13.6.1.2 立管风险分析 Analysis of Riser Risk

立管泄漏的分析也包括柔性流送管的泄漏,从风险角度来看这对于浮式生产平台是关键性的。紧靠这一海上设施的管线泄漏也应包括在同一范畴内,不过其重要性通常较低。火灾大小是由下列几个方面确定的:

- 孔洞大小;
- 管线直径;
- 管线内压力;
- 流径内的阻碍。

在立管或流送管全口径破裂的情况下,火灾的规模可以达到极限。为了预测在摩擦损耗是决定性因素这样的场景中的时变流量,需要非常复杂的软件。值得争议的是,需要准确预测流量达到何种程度,但有时重要的是要精确地知晓火灾的持续时间。如果预先考虑到人员可以停留在庇护所(如果在连接桥楼的设施上才相关的话)或者如果为此种场景的持续发展提供结构性消防的话,情况就会如此。流动(和任何火灾)的持续性将由下列几个方面来确定:

- 是否安装海底隔离阀(SSIV)，如果是这样的话：
  - ○ 激活的响应时间；
  - ○ 定位；
- 管线中碳氢化合物的存量。

13.6.1.3　生产泄漏的分析 Analysis of Process Leaks

此种分析可能要求最努力地参与分析工作，因为此类泄漏的多数都是微量泄漏。如果所提供的安全系统是合适的，那么一般情况下这样的泄漏将不会导致事故的事态加剧。这就是涉及多种场景时需要仔细考虑安全系统的原因所在。

事态加剧的时间、火灾频率和概率之间的理想化关系如图 13.5 所示，如果这些曲线是可以从事件树中导出的话。根据火灾持续时间假设火灾频率下降，这样持续时间长的火灾可能少于持续时间短的火灾。事件树中对不同泄漏场景和路径的分析应当是建立曲线的基础。考虑到事件树路径中不同的事态加剧机制并以此作为时变函数进行建模，其结果同时就是事态加剧的概率。

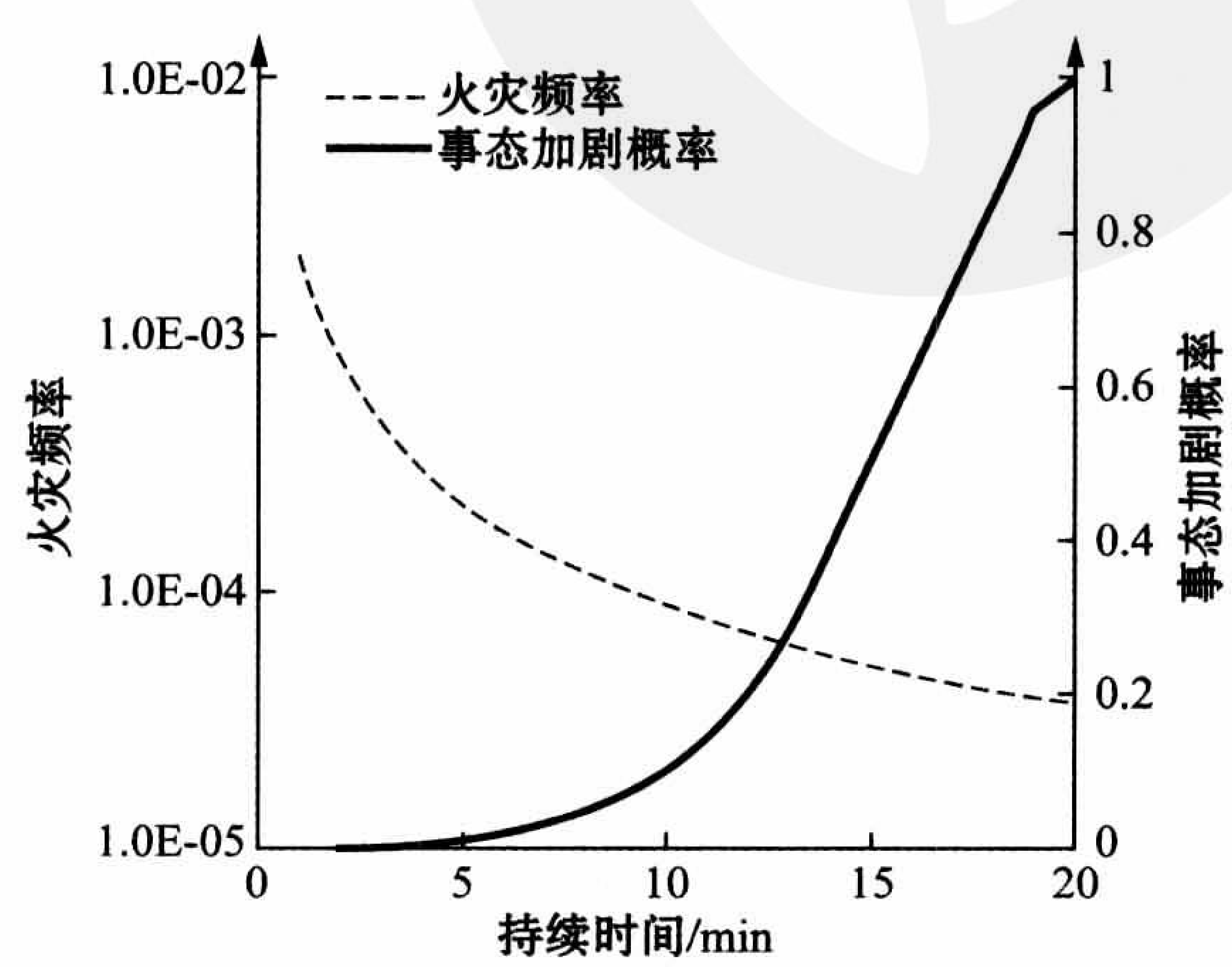


图 13.5　与持续时间关联的频率的理想化建模

为了使模型具有所需敏感性来反映在安全系统中的变化，分析时有许多方面是需要加以考虑的，包括：

● 将理想化模型应用到包括边界在内的复杂模型中；
● 隔离和放空的影响；
● 浸水影响；
● 对其他系统造成影响的事态加剧

在防止某一区域或模块(即一个消防单元)内部出现事态加剧方面，有以下几种情况需要分别加以考虑：

● 如果一个消防单元内的所有设备属于相同的区段，那么原则上就没有明确要求来防止单元内部出现事态加剧的情形，因为该区段的全部内容会被用作针对其他区域的防火屏障的设计基础。
● 如果相同的单元内有几个区段，那么就必须考虑到两种分属情况：
  ○ 如果在来自所考虑单元内所有区段的碳水化合物含量的基础上结合其他区域来设计防火屏障，那么情况同上。
  ○ 如果只在来自所考虑单元其中一个区段的碳水化合物最大含量的基础上结合其他区域来设计防火屏障，那么就必须提供广泛的防护以阻止事态加剧从一个区段发展到其他段。

原则上应当为每一个模块的每一个泄漏场景开发出如图 13.5 所示的图表，但是人们可能会期待实行离散化处理，以使每个模块都确立起若干有代表性的案例。

图 13.6 所示为第一级分离器与液体一侧下游设备之间的隔离阀位置。模块 M2 是第一级分离器区域，模块 m^3 包含了第二级分离过程。M4 区域是对产生的水进行处理的区域。

就隔离阀而言，下列是基于上述原理的替代方案：

● 如果在 M2 和 M3 区域之间安装防火墙，“C”位置上的阀门将是一个过程切断(PSD)服务阀。这也是假定第二级分离器上游和防火墙下游有一个检测阀(“H”位置)。
● 如果 M2 和 M3 区域的设计火灾载荷是基于第一级和第二级分离器容量的，即使在 M2 和 M3 区域之间没有安装防火墙，那么“C”位置的阀门将

是一个过程切断(PSD)服务阀。

- 如果 M2 和 M3 区域的设计火灾载荷是基于第一级或第二级分离器容量的，如果在 M2 和 M3 区域之间没有安装防火墙，那么“C”位置的阀门将是一个应急切断(ESD)服务阀。

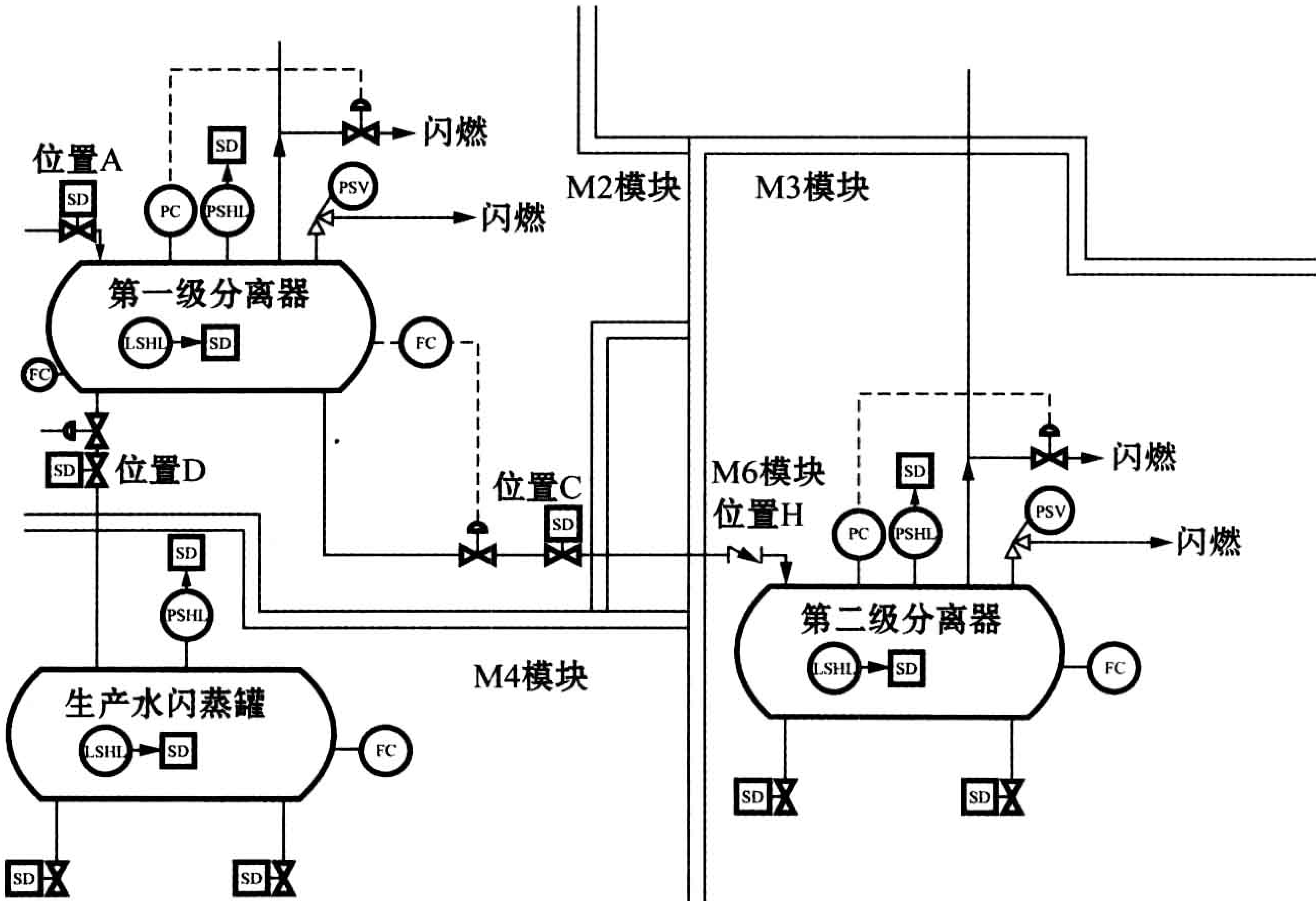


图 13.6　关于 3 个生产容器和可能的隔离阀位置的示意简图

关于阀门“C”的功能，发展出以下场景：如果在 M2 和 M3 区域之间设有一道防火墙，那么在 M2 发生的火灾将不会影响到 M3 的设备(反之亦然)。这意味着 M3 处的检测阀将不会受到在 M2 可能发生的火灾的影响。通过这个检测阀，在 M3 的压力容器将相应地受到安全和可靠的保护，不会受到在 M2 发生的火灾的影响。这同样适用于在 M3 发生火灾时的情况。

对 M2 的设计火灾载荷的评估必须基于在 M2 的最大火灾潜力，即 M2 的压力容器的含量。当火灾发生在同一个模块时，没有特别的要求适用于 M2 的阀门。因此，在各模块之间设有一道防火墙的情况下不需要应急切断(ESD)阀。

在两个模块之间没有安装防火墙的时候，设计火灾载荷就是决定性因素。如果在模块 M2 和 M3 内的碳氢化合物总含量是设计的基础，就没有特别的要

求适用于 M2 和 M3 之间的阀门。所以，阀门可以是过程切断(PSD)类型的。

如果设计火灾载荷相当于 M2 和 M3 内容器的最高载荷的含量，那么位置“C”处的阀门所需要的是应急切断(ESD)类型的。在火灾场景里，应急切断(ESD)阀的关闭功能具有最大的可靠性。这是限制火灾持续时间以符合设计基础所必需的。类似地，在 M3 发生火灾的情况下，需要对 M2 的压力容器实施隔离。

确切地说，同样的要求也适用于在各级分离过程和生产水处理箱之间的位置“D”处的阀门。

应该注意到，如果在压力缓解点之间只安装一个隔离阀，那么模块 M6 就不需要切断阀。这意味着在 M6 的管路压力或在 M2 或在 m^3 得到缓解。

最后可以注意到，如果对应急切断(ESD)和过程切断(PSD)类型的阀门有不同的要求，那么为了简化操作和维护工作，同一设备的规格亦适用于这两种类型的阀门。

13.6.1.4 推荐的火灾载荷 Recommended Fire Loads

为了选择火灾场景，挪威石油标准化组织(NORSOK)技术安全 S-001 指导准则(NORSOK，2000)推荐在被动消防规格中使用的火灾载荷。这个版本的 NORSOK 指导准则也推荐如何使用平均和局部最大载荷，并对主动消防用水保护的作用给出了肯定。这之所以重要的原因在于挪威主管机构当前并不接受如此做出的肯定。

新版 S-001 (Norsok，2006)已推荐使用略有变化的数值，在某种程度上它们要高于 2000 版本。所推荐的新的数值见表 13.4。

表 13.4 挪威石油标准化组织(NORSOK)推荐使用的火灾载荷

	喷射火		池火
	质量泄漏率大于 2kg/s	质量泄漏率为 0.1～2kg/s	
局部峰值热载荷	$350kW/m^2$	$250kW/m^2$	$150kW/m^2$
局部平均热载荷	$100kW/m^2$	$0kW/m^2$	$100kW/m^2$

2006 版 S-001 提议应用浸水可降低热载荷 30%。

13.6.2　针对爆炸载荷的设计 Design Against Explosion Loads

涉及爆炸载荷的设计通常必须考虑到概率因素，因为无论从技术上还是从经济上来看，最坏情况下的设计是不可能的。

在高级爆炸载荷的评估中需要考虑下列主要特性：

- 泄漏自身，即时变流量；
- 气体扩散；
- 起火特征；
- 爆炸载荷、时变（和特定位置）的压力瞬变值；
- 设备和结构的载荷响应；
- 载荷降低行动的可能影响。

两个模块的理想化概率分布的例子如图 13.7 所示。图中显示有两条不同的曲线，但形状相同，表示场景颇为类似。曲线的重要部分在 0.5～1.0bar 区间内，这里可能会发生次级失效。在这个区间内两条曲线之间的区别非常明显，其条件概率会发生变化，系数可高达 4。

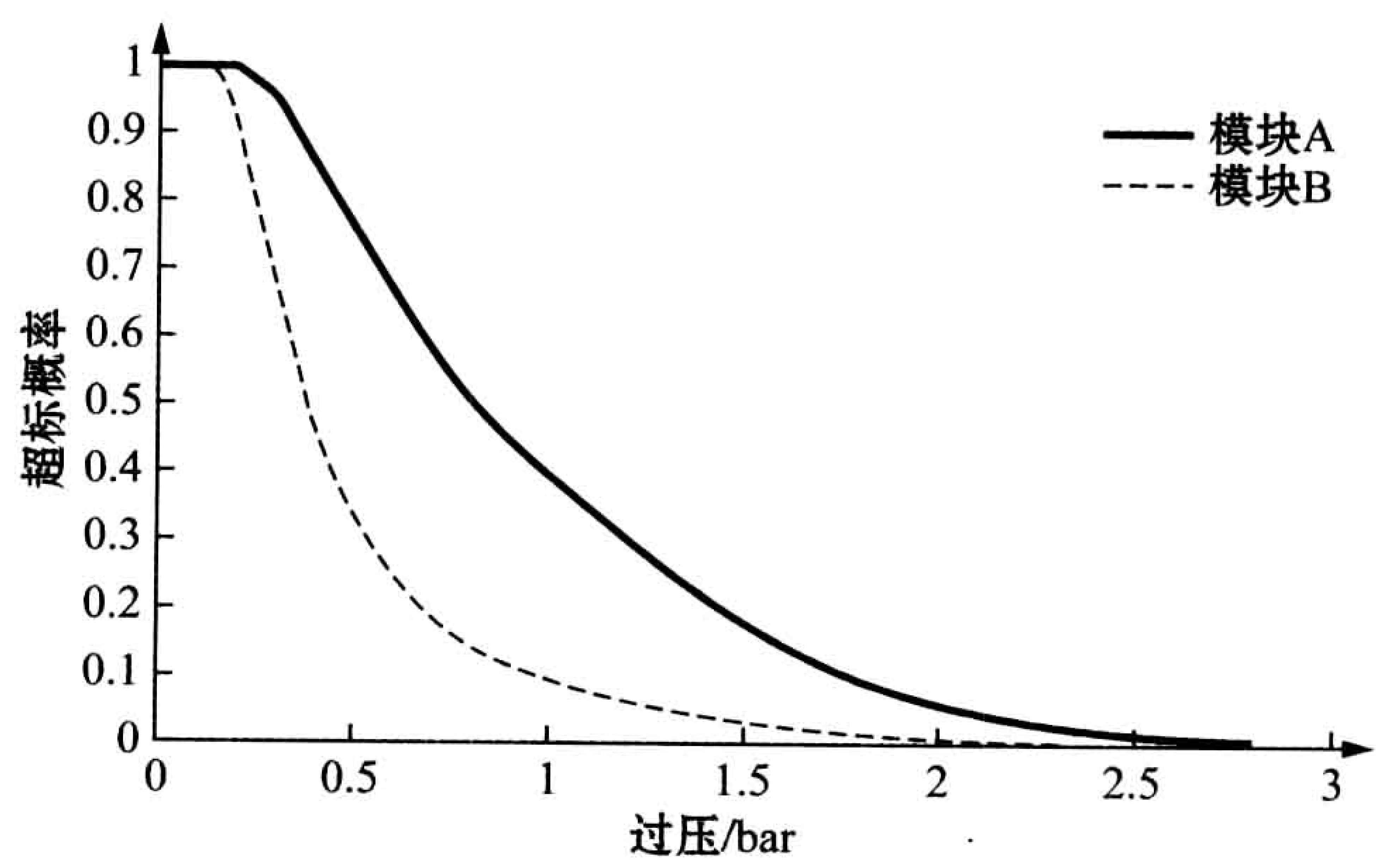


图 13.7　爆炸载荷的理想化超标概率曲线

在爆炸载荷和响应的详细概率评价过程中，应该处理下列方面的内容：

时变泄漏
- 流动状况，即气体喷射或冷凝物流动；
- 泄漏点的定位；
- 几何形状的考虑：
  - 气体：喷射方向；
  - 冷凝物：流动方向；
- 时变流量；
- 区段建模，明确的或平均的；
- 气体扩散
- 通风特性，风向/风力
- 扩散建模；
- 选择要考虑的理想化情况；

起火特征
- 扩散与起火之间的相互作用；
- 起火源类型之间的区别；
- 起火源的定位；
- 时变起火概率；

爆炸载荷
- 爆炸过压建模的选择（例如，基于计算流体力学的或经验性的）；
- 决定几何建模；
- 对不能明确计算的情况进行简化；
- 源自爆炸的外部影响；

载荷响应
- 务必选择载荷分析类型；
- 需要确立与设备和结构相关的失效定义准则；

载荷降低影响
- 加强通风；
- 减少堵塞；
- 浸水的积极应用。

13.6.3 针对碰撞冲击力的设计 Design Against Collision Impacts

碰撞风险通常由两种类型的碰撞场景组成：

- 船舶撞击海上设施(因动力推动及漂流);
- 海上设施和附近的浮式平台之间的碰撞(水上旅馆、起重船、穿梭油船等)

附近的浮式平台通常不会产生额外的设计载荷,除非是浮式混凝土结构,因壁面上会造成局部穿孔。为了新平台的定位,应该进行该区域的交通调查,以此作为碰撞概率量化的基础。这可以用于概率和后果分析。

需要对每种船型确立速度分布,以区分迎面碰撞和漂流(见第 10 章)碰撞,后者情况下需要考虑风和波浪的条件。确定碰撞能量时需要区别对待各种不同的碰撞场景,并考虑几何方面的情况和大小规格。

进行后果分析时,海上设施上的载荷将是首要关注对象,但是下列影响也需要考虑:

- 船舶的上层建筑会影响甲板结构;
- 船舶会冲击立管、导管或非结构元素;
- 船舶会沉没并引起管线和其他水下设施出现破损情况;
- 船舶发生火灾也会对海上设施形成威胁。

过往船舶的冲击概率需要考虑到第 10 章中概述的内容。同时也需要考虑警报和/或援助情况以及援助漂流船舶的应急程序。

13.6.4　针对坠落载荷冲击力的设计 Design Against Dropped Load Impact

坠落物体的冲击力可以引起碳氢化合物系统的破损,由此造成泄漏或重大的结构破损。应该处理以下意外事件:

- 起重机、吊杆或载荷坠落于顶边设备或结构上;
- 起重机、吊杆或载荷坠落于海中。

需要处理可能坠落物体的不同大小规格和载荷。破损概率需要处理:

● 坠落概率，反映了起重机、制动系统和（如果已知）程序约束的设计；
● 物体击中一个特定系统的概率；
● 冲击系统的载荷。

如果坠落载荷的能量足以引起泄漏，这些场景应被转入到碳氢化合物泄漏的分析中，包括起火概率，从而反映出坠落自身就是一个起火源的概率。发生坠落载荷引起结构破损的情况时，必须考虑逐渐增加的崩溃概率。

13.7 安全完整性水平 Safety Integrity Levels

国际电工委员会（IEC）标准 61508 和 61511（IEC 2000，2003）为安全系统可靠性要求引进了一个分类计划，它被广泛应用于离岸油气业。挪威石油工业协会（OLF）文件 070 号（OLF，2004a）提出了将上述 IEC 标准应用到挪威石油工业中去的推荐性指导准则。而 IEC 标准的篇幅长，导致作为设计输入信息的过程冗长，所以挪威石油工业协会指导准则简化了要求，排除了冗长分析的需要。

国际电工委员会（IEC）标准陈述了计划和执行安全系统的若干要求，包括对受控设备（EUC）的熟悉和定义、危险识别、受控设备之间的互动和风险评估。然而，因为在早期概念阶段关于海上设施的细节少之又少，所以不得不在一般意义上进行所有的这些评价。这意味着决策者必须依赖于从其他类似的项目中获取的知识。

原则上假定安全完整性水平（SIL）的要求示基于风险评估的。挪威石油工业协会（OLF）070 号文件对每一个安全功能推荐了最低的安全完整性水平要求，而这些最低的安全完整性水平要求则被用作量化风险评估的输入数据。挪威石油工业协会 070 号文件已经为许多的基本安全功能定义了安全完整性水平要求，如表 13.5 所示。下文是安全完整性水平（SIL）的诠释：

● SIL 1：应要求所需的最大无效为 10－1＝10％

- SIL 2：应要求所需的最大无效为 $10^{-2}=1\%$
- SIL 3：应要求所需的最大无效为 $10^{-3}=0.1\%$

表 13.5　源自挪威石油工业协会 070 号文件的安全完整性水平(SIL)要求的概要

安全功能	SIL	安全功能	SIL
生产分离	1	过程切断功能	2
过程切断/应急切断功能	2	应急切断功能	2
减压(放空)	2	顶边油井隔离	3
立管隔离	2	火灾探测	2
气体探测	2	电气隔离	2
释放消防用水/浸水	2	手工启动 F&G/应急切断	2
启动压载系统	1	压载系统的应急停止	2
海底应急切断(油井隔离)	3	井喷防止钻井功能	2

第 14 章　源自量化风险评估研究的风险结果呈现

Presentation of Risk Results from QRA Studies

风险结果呈现的要求之一是，结合对各种条件和弱点的详尽洞察，给出对风险状况的一个完整的概述。这些是相对含糊的要求，对于大多数从业者来说其寓意可能并不清晰。本章尝试填补这个空白，并设法阐明如何来呈现海上设施上的风险状况图。

仅仅考虑人员的死亡风险。用假设的结果选定一个假设的浮式生产储卸装置(FPSO)概念。只包括海上设施上的死亡事故。强调的是有关风险的呈现。因而，省略了任何对风险接受准则的参照。

14.1 对风险呈现的要求 Requirements for Risk Presentation

14.1.1 监管要求 Regulatory Requirements

至少如果考虑全世界的离岸作业法规，那么挪威的法规对风险结果的呈现具有最广泛的要求。健康、安全和环境(PSA，2002b)的管理规范有两个小节对重大危险风险和结果呈现提出了进行分析的要求。两小节的内容如下：

> 第 14 节
> 重大事故风险的分析
>
> 需进行定量风险分析和其他必要的分析，以识别出重大事故风险的促成因素，包括表现：
>
> a) 与计划中的钻探和油井活动有关联的风险，并显示出这些活动对有关设施的总风险具有什么影响；
> b) 改造和实施改造对总风险的影响；
> c) 与大陆架和海岸之间以及设施之间的人员运输有关联的风险。

此外，分析可以用来确定作业条件，并对涉及风险的区域、系统和设备进行分类。

第 15 节
定量风险分析和应急预案分析

所进行的定量风险分析应提供一个平衡且尽可能全面的风险状况说明。风险分析包括：

a）识别危险和事故的形势，选择触发事件，并绘制图表查出偶发事件的起因；
b）进行事故序列和后果建模，以便除了其他事项之外能够揭示出物理屏障之间可能的关联性，并计算出必须设定的关于屏障性能的要求；
c）将重要的安全系统进行分类；
d）显示主要的安全功能已准备充分；
e）识别计算意外载荷；
f）为选择已定义的危险和事故的形势提供基础。

可以进行必要的敏感性计算和不确定性评价。需进行应急预案分析，包括：

a）定义危险和事故的形势；
b）设定对应急预案的性能要求；
c）对应急预案的相关措施进行选择和量化。

14.1.2 风险结果呈现和风险接受准则 Risk Result Presentation and Risk Acceptance Criteria

一个需要立即澄清的重大误解如下：风险结果的呈现不应局限于风险接受准则可以表达的参数。

在大多数情况下，如果风险接受准则是一个死亡事故率（FAR）的数值，那么如图 14.1 所示的图表则说明了与死亡事故率的极限有关的结果，而根本就不对结果做进一步的说明。

这意味着，投入到对火灾、爆炸和冲击的后果进行建模的几百个工时可能没有被适当地利用，它们仅仅被用于产出数量上的结果，但对于什么是可能的场景和后果这个问题的所有洞察却一无用处。这应该予以避免。避免它的方式详见本章下文。

14.1.3 所建议的呈现格式 Proposed Presentation Format

在第 14.1.1 节中关于呈现内容的要求可以总结如下：

- 平衡而全面的风险状况；
- 敏感性计算；
- 不确定性评价。

这些要求是以一种实用的方式表达出来的，为用户留下了许多诠释和评价的空间。可以这么说，“平衡而全面的风险状况”已鲜见于量化风险评估的研究报告中（如果有的话），但至少还出现在作者的经验中。

应该强调的是，风险呈现的目标始终是为关于降低风险措施的决策提供一个基础。

应该注意到，第 14 节(c)款要求缘于人员运输的风险必须包括在内。在下列的呈现中仅仅包括了在海上设施上的死亡事故，而没有源自人员运输的死亡事故。

14.2 根据应用范围呈现风险 Presentation of Risk According to Application Area

14.2.1 生命周期各阶段 Life Cycle Phases

关于风险结果呈现的要求必须反映风险分析应用的实际范围。这是指在

不同的生命周期各阶段所采用的呈现方式需要对实际阶段进行专门的定制。以下是各阶段特定要求的简要概述：

- 设计阶段：
  - ○ 特别强调计算意外载荷，请见第 13 章。
- 作业阶段：
  - ○ 在稳定生产期间有限变化的影响；
  - ○ 当相关时，关于重大改造的提议的影响；
  - ○ 当相关时，同步作业的影响。
- 退役阶段：
  - ○ 特别强调放弃作业，请参见第 7.9 节。

14.2.2 最低合理可行原则评价 ALARP Evaluations

风险分析结果的重要益处之一出现在进行最低合理可行原则（ALARP）评价的过程中，即为了证明变化的影响。然而对此进行广泛的讨论超出了本书的范围，在 Aven and Vinnem (2007)中对此进行了有些深度的讨论。

在这方面仍然要强调的是，风险结果的呈现必须为最低合理可行原则的评价给出广泛的输入信息。

14.2.3 不同用户群体的风险呈现 Risk Presentation for Different User Groups

在涉及对关于风险和自身资质的信息有何需求方面，风险结果的呈现还需要对不同的用户群体进行专门的定制。可以考虑以下用户群体：

- 作业配员和维修配员；
- 海上设施管理，全体岸上配员；
- 健康、环境与安全（HES）专家。

针对配员情况进行呈现时，应当使易于理解的各项条件尽可能到位，相关建议参见第 14.8 节。本章的剩余部分是针对管理需求而制定的，在某种程度上也是写给健康、环境与安全（HES）专家的。后一个群体通常还需要更加详尽的呈现内容，它们通常作为主要报告的附录。

14.2.4　风险呈现的框架 Framework for Risk Presentations

在本章的剩余部分，风险呈现的框架是一种更为通用的风险呈现方式，其中并没有对特定的生命周期阶段给予关注。

14.3　总风险的呈现 Presentation of Overall Risk

14.3.1　主要结果 Main Results

总风险的呈现需要将重点放在总平均风险等级和海上设施的特定群体和区域的风险等级上。应该陈述如个体风险（IR）或死亡事故率（FAR）（参见第 2.1.3 节中的定义）这样的预期值，以及死亡事故的分布，如频数（*f*-*N*）曲线（或类似的）形式。下文会述及这二者。

应该强调的是，应并行使用几个风险参数，例如潜在人命丧失（PLL）、个体风险（IR）、死亡事故率（FAR）。不同的布置会有不同的影响。例如，如果配员人数减少，这将使潜在人命丧失（PLL）的量值降低，但是通常不会降低个体风险或死亡事故率 FAR。

图 14.1 所示为浮式生产储卸装置（FPSO）概念以及下列配员群体的总风险结果，是全体配员的平均值：

- 生产配员；
- 海事作业配员；
- 行政和办公配员。

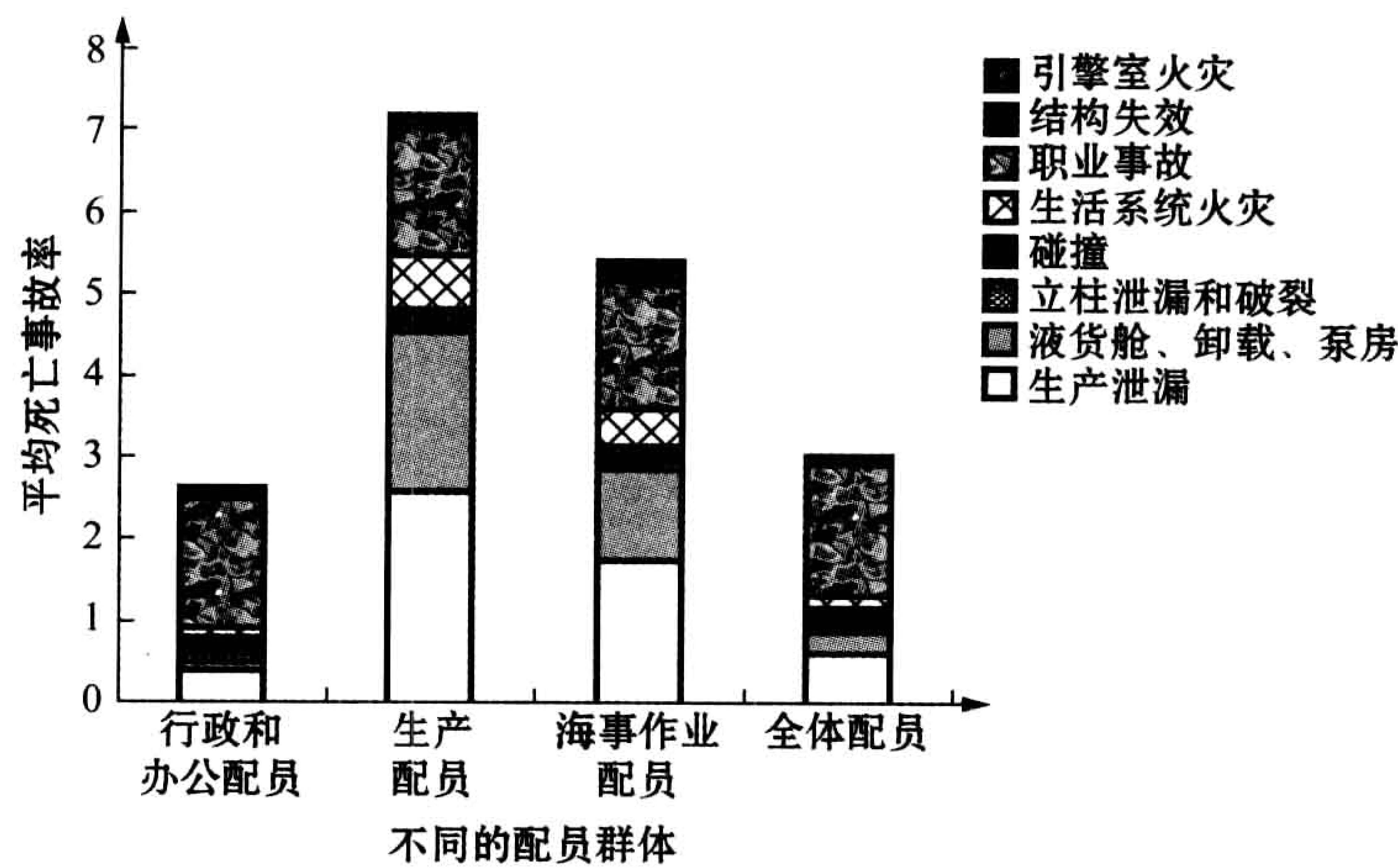


图 14.1　不同配员群体和全体配员的平均死亡事故率的呈现

图 14.1 还显示了源自不同的危险类型所占的比重，如生产泄漏、液货舱等。在真实的情况下，应彻底讨论源自不同的危险所占的比重。

图 14.2 所示为这一概念的频数(f-N)曲线，包含了源自立即死亡风险和职

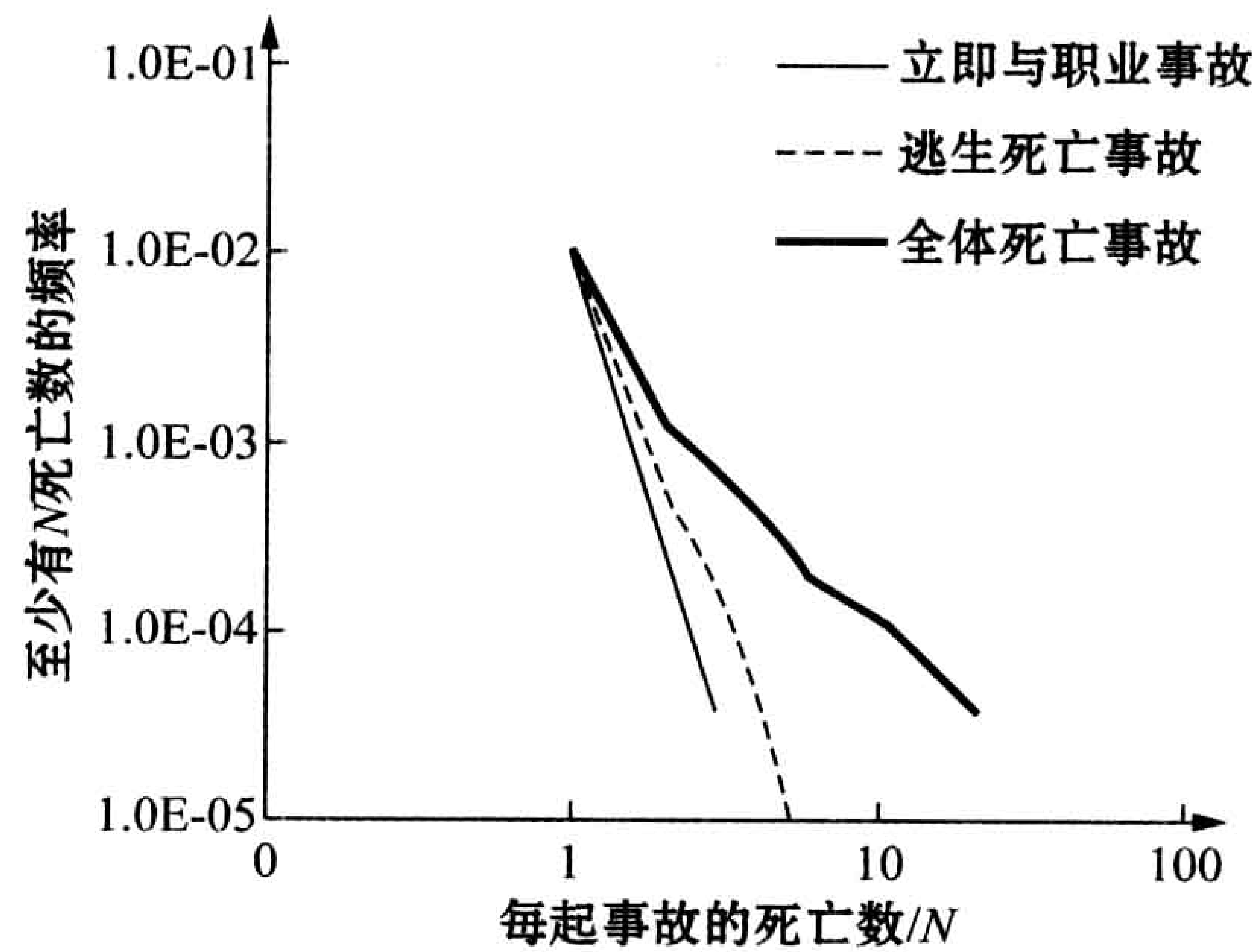


图 14.2　立即与职业事故、逃生死亡事故和全体死亡事故的频数曲线图

业事故以及逃生死亡事故所占的比重。

在图 14.2 中，“逃生”与“全体死亡”曲线之间的差别符合源自在撤离和救援期间的死亡事故所占的比重。在真实的情况下，应当讨论源自不同危险的比重，但由于是假设数据，这里就省略了。

如图 14.2 所示，死亡事故的计算频率为每年 0.01，而具有至少 10 起死亡事故的频率约为每年 0.0001。该图进一步显示，在撤离和搭救期间的死亡在具有 3 起或更多死亡的事故中占主要比例。

14.3.2 风险结果的参照 References for Risk Results

风险结果的参照值在阐明结果的实际意义方面很有用，易于非专家群体的感受。这至少有两种方式可以为之，即与类似海上设施进行比较，或与社会中的其他活动进行比较。

总风险呈现的一个重要方面是将风险等级与其他类似的概念进行比较。图 14.3 所示为一个将浮式生产储卸装置(FPSO)概念与类似的概念进行比较的例子。

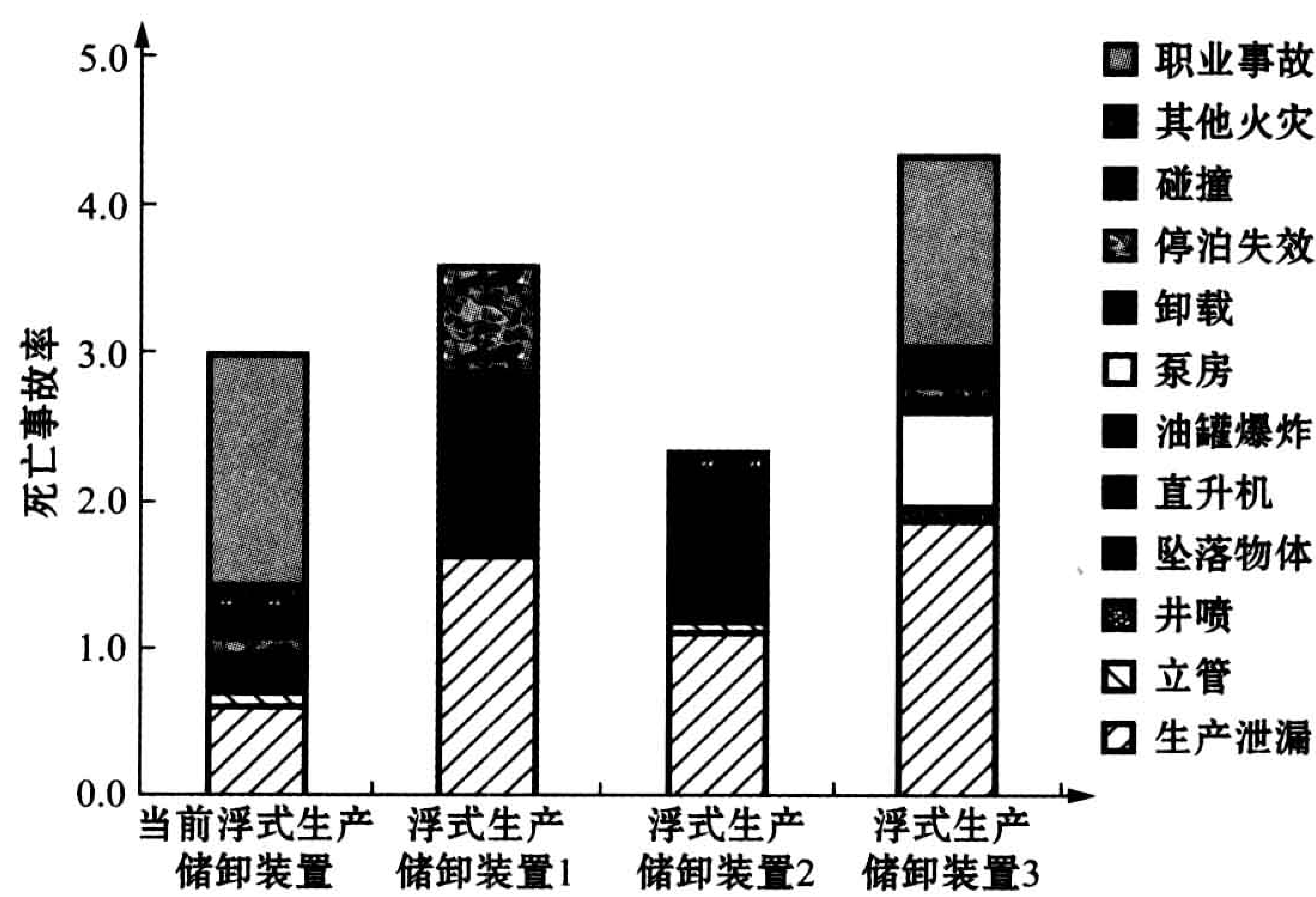


图 14.3　实际概念与替代浮式生产储卸装置(FPSO)概念的比较

所谓的“当前浮式生产储卸装置(FPSO)”有点特别，意指它具有几个不同寻常的特征。因此，与其他的浮式生产储卸装置(FPSO)，主要是与常规的解决方案进行比较显得特别重要。在真实的情况下，应讨论比较的细节，但在此略去。

有时将风险等级与驾驶汽车和摩托车、还有登山等的风险进行比较。更可取的是，应相对于同类行业进行比较，例如岸上石油设备、化学工业、采矿业等。

阐明死亡事故率(FAR)等级含义的一个简单方式如下：死亡事故率(FAR)的数值指的是在1亿工时里的死亡数。在2003年至2005年期间，在挪威海上生产设施和移动平台上所耗用的工时总数是9 840万，即有约1亿工时用于实际用途。这意味着，所有实际用途的经验死亡事故率(FAR)数值可以作为在一个3年期内已发生在挪威大陆架上的死亡数。以下是在约4个3年期内的死亡数一览：

- 2000～2002年：　3个死亡；
- 2001～2003年：　2个死亡；
- 2002～2004年：　2个死亡；
- 2003～2005年：　0个死亡。

应该注意到，所有的这些死亡均缘于职业事故，自1985年以来在各类海上设施上(不包括运输)的重大事故(请参见第2.1.2节中的定义)中没有出现过死亡情况。

14.4 风险影响的呈现 Presentation of Risk Contributions

14.4.1 死亡事故率的影响 FAR Contributions

风险影响的呈现也许就是需要最多进行改进的地方。其影响的呈现常常

局限于图 14.1 所示的内容。为了更好地了解重要的风险参数，以作为识别和评价潜在的降低风险措施的基础，通常有许多个视角值得介绍。下文所呈现的是一些不同的说明。

浮式生产储卸装置(FPSO)概念的总潜在人命丧失(PLL)数值是每年 0.015 个死亡数，其组成比例如下：

- 立即死亡：　　8.4%；
- 逃生死亡：　　6.2%；
- 撤离/救援死亡：　33.4%；
- 职业死亡：　　52.1%。

撤离和救援所占的高比重说明，存在着与这个阶段相关的降低风险的可能性。在真实的情况下，应更加彻底地讨论这些比重，但在此省略。图 14.4 所示为在不同区域和舱室中的平均死亡事故率数值一览。图中还显示了源自事故不同阶段所占的比重。

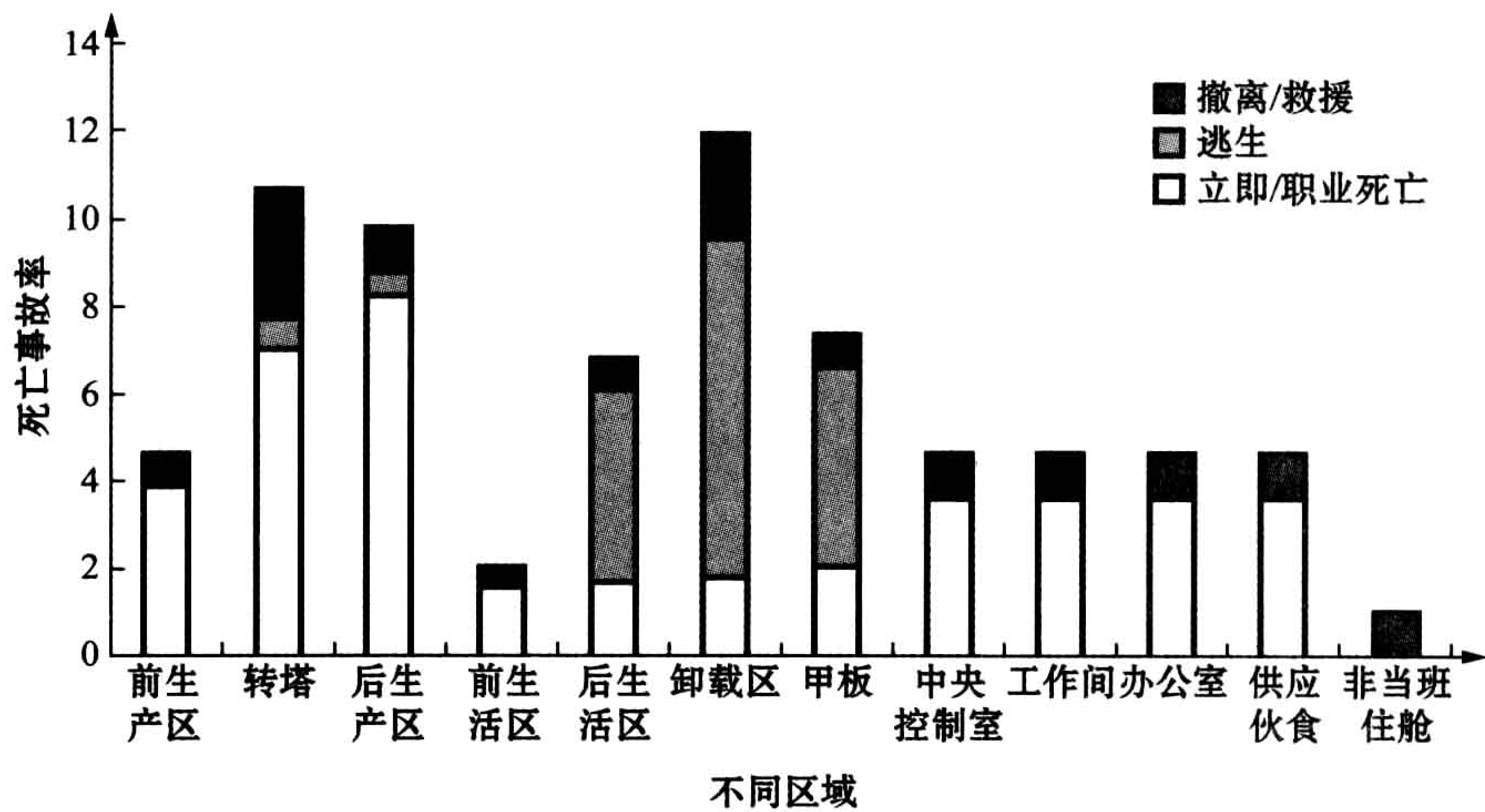


图 14.4　每个区域日班和夜班的平均死亡事故率(FAR)数值

图 14.4 显示，在生产区域和转塔处立即和职业死亡处于主导地位。而在离住舱最远的区域，逃生期间的死亡处于主导地位。

尽管配员水平常常很不相同，但日班与夜班之间的差别微小。图 14.5 显

示了日班期间的死亡事故率水平，而图 14.6 所示为夜班期间的死亡事故率水平。

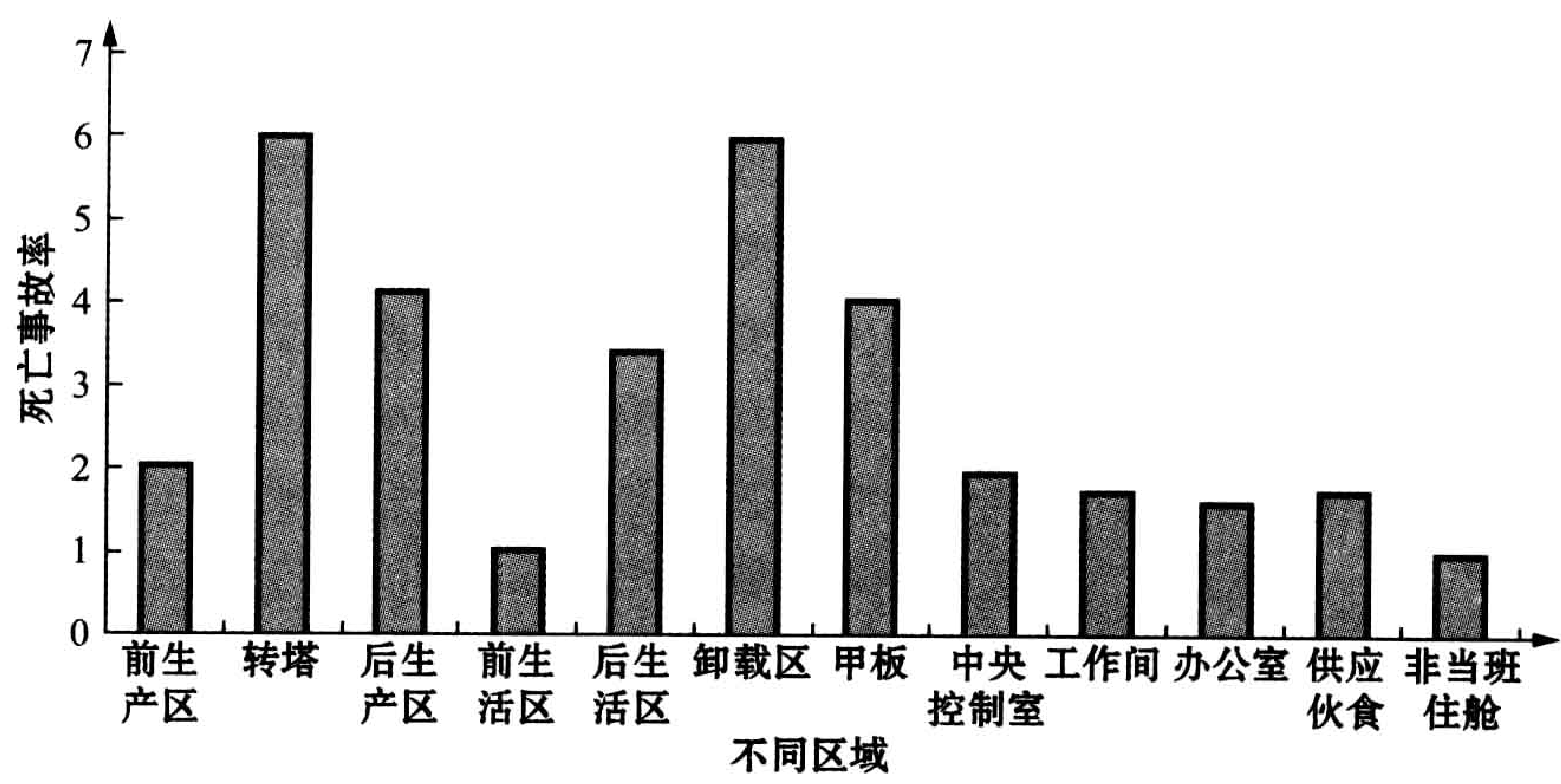


图 14.5　仅在日班时每个区域的死亡事故率(FAR)数值

源自不同事故类型即生产泄漏、立管泄漏、液货舱火灾、引擎室火灾、碰撞和结构失效所占的比重如图 14.1 所示。在真实的情况下，应更加彻底地讨论其所占比例，但在此因假设数据而略去。在真实的情况下还应该讨论图 14.5 和图 14.6 之间的区别。

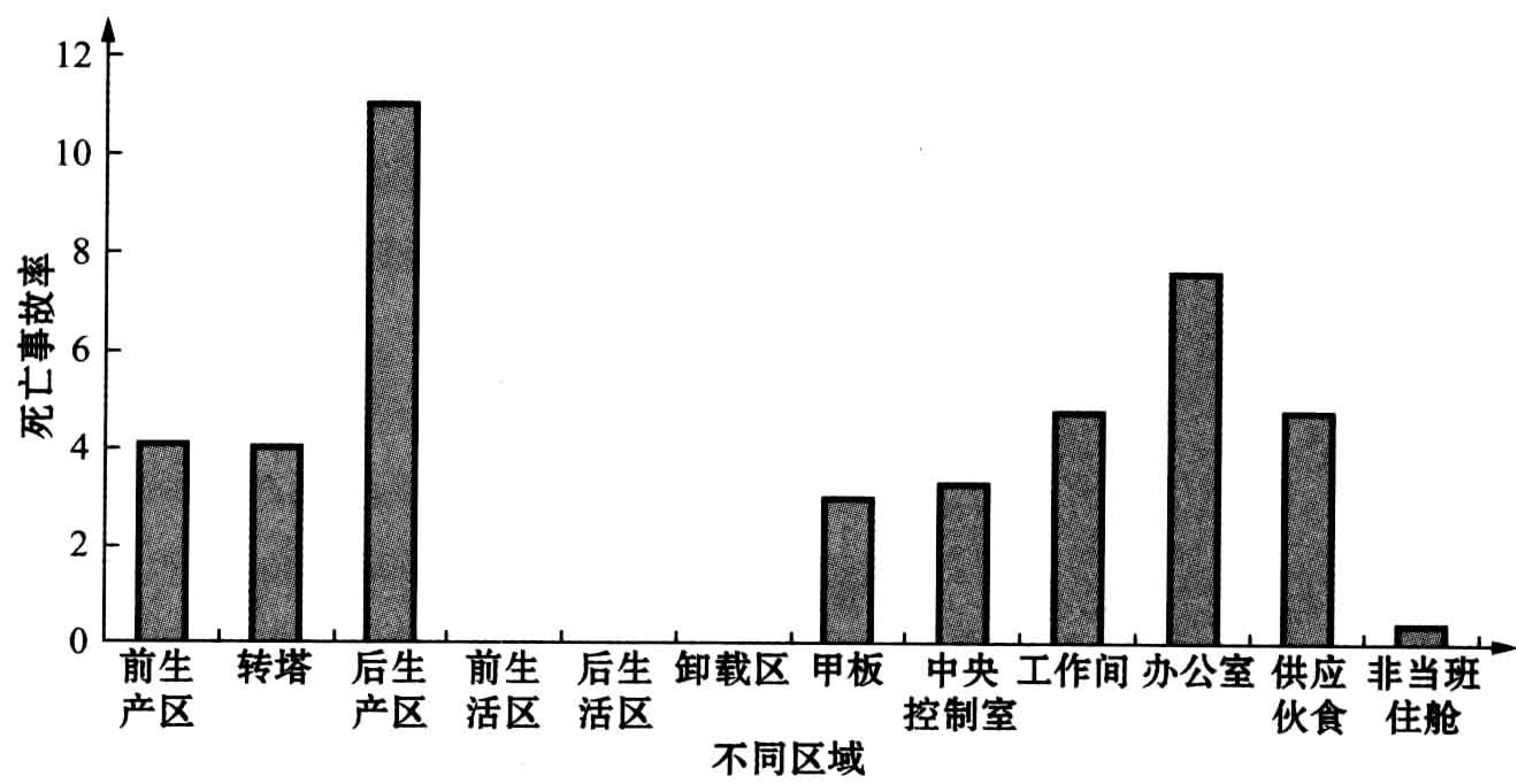


图 14.6　仅在夜班时每个区域的死亡事故率(FAR)数值

图 14.7 所示为每起起火事件(火灾或爆炸)在每个区域的死亡平均数。该数值包括立即死亡、逃生死亡以及撤离和救援死亡,其中的立即死亡为单独显示。正如预期的一样,立即死亡在生产区域中占主要比重。该图的基础仅仅是缘于火灾和爆炸造成的死亡事故,其他死亡事故如职业死亡并不包括在内。在某些区域,立即死亡并不占据显著比重。

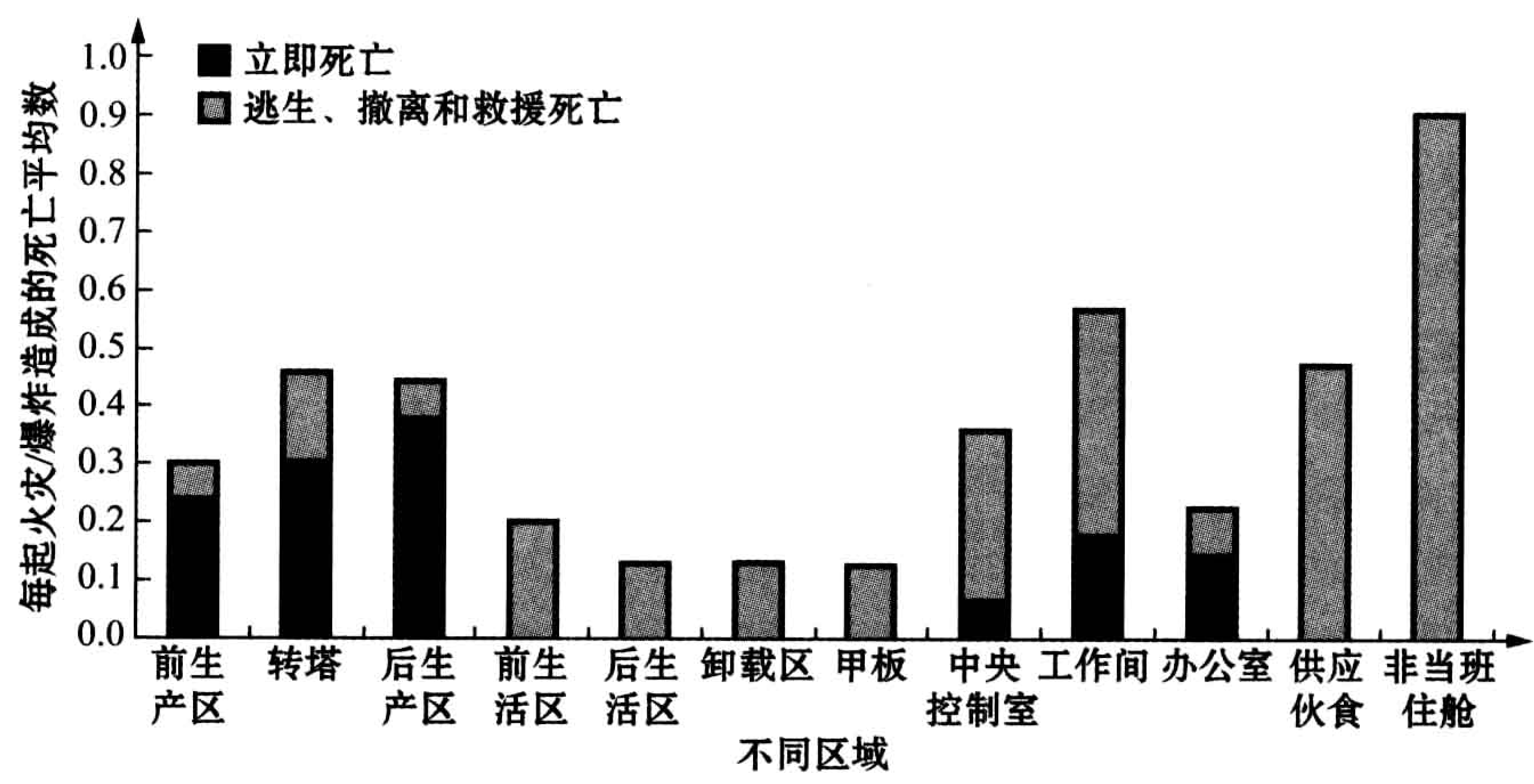


图 14.7　每起火灾/爆炸在每个区域造成的死亡平均数

14.4.2　泄漏频率的影响 Contributions for Leak Frequencies

图 14.8 所示为每个生产区的总泄漏频率和平均起火概率的图示。在真实的情况下,应更加彻底讨论此类影响情况。

图 14.9 呈现了源自技术性失误和因人员干预而产生的泄漏在主要区域的总泄漏频率中所占的比重。在真实的情况下,应更加彻底地讨论所占比重。这些结果通常不予显示,但在将来应该包括在内。

14.4.3　火灾与爆炸特征 Fire and Explosion Characteristics

图 14.10 所示为海上设施上不同区域内可控和不可控火灾的持续时间。

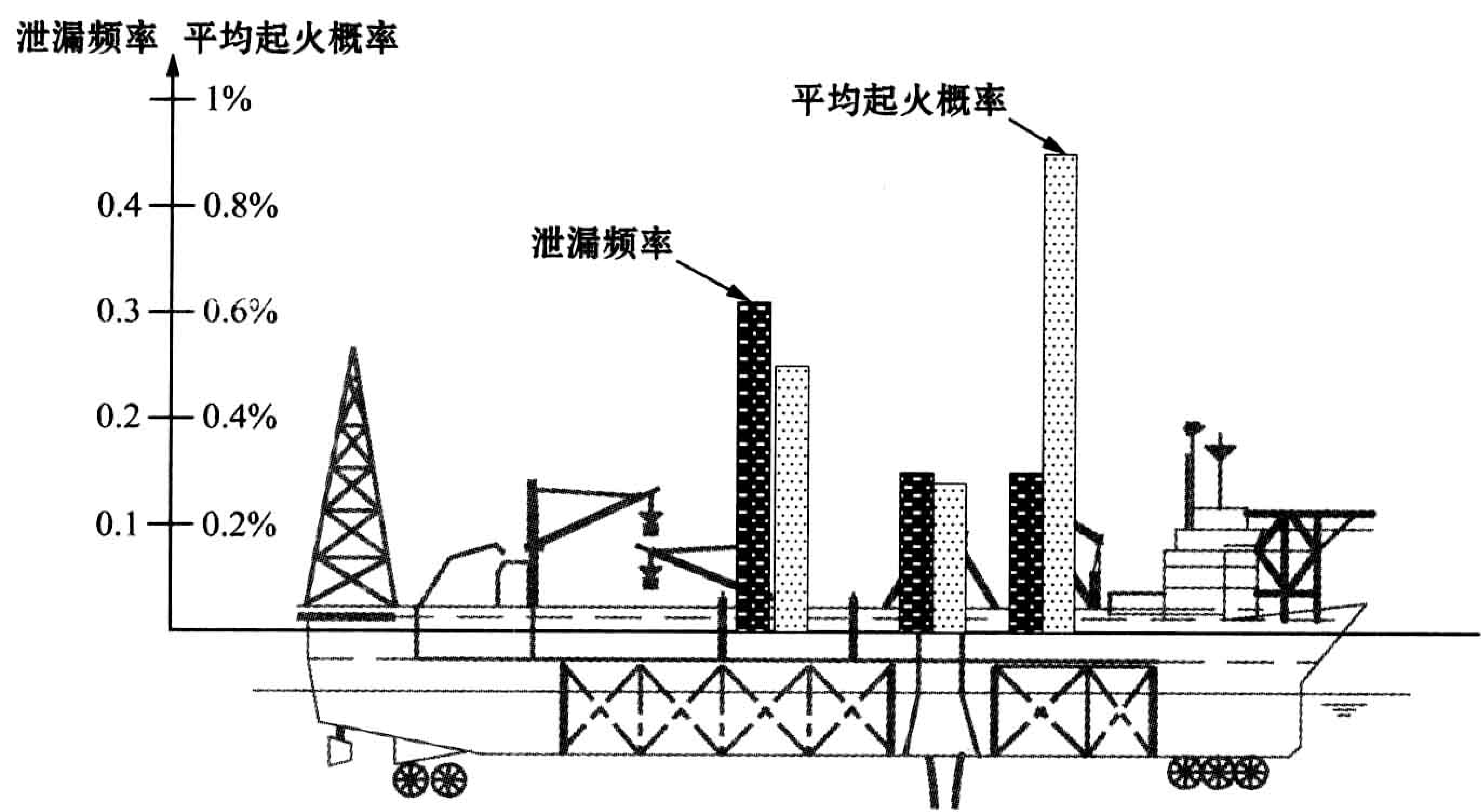


图 14.8 生产区的泄漏频率和平均起火概率

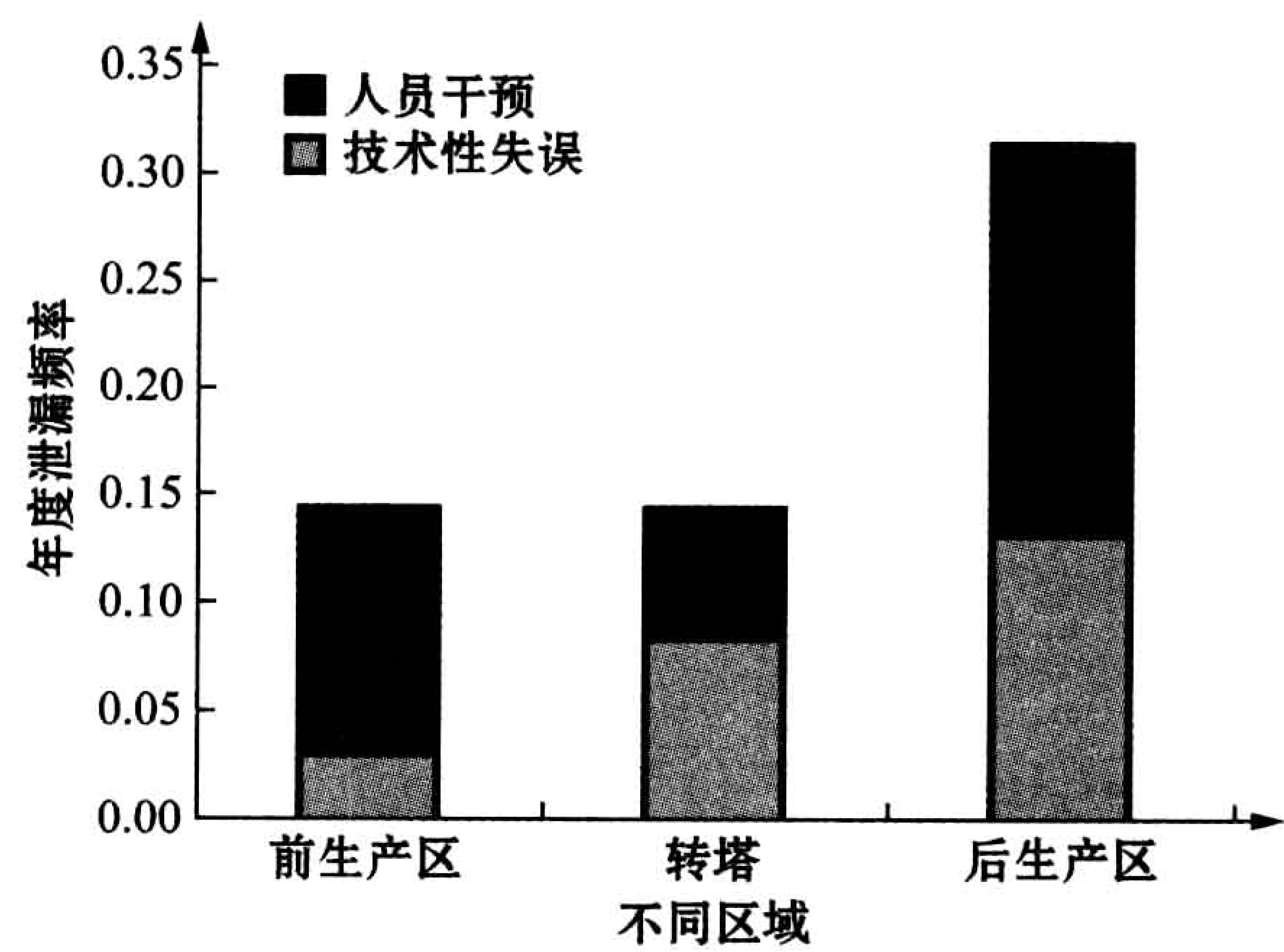


图 14.9 源自技术性失误和人员干预期间发生泄漏的比重

对此做如下诠释:可控火灾就是除了对主动消防装置不予理会之外的所有安全系统均作为屏障系统履行其功能的火灾。所显示的持续时间是最大的持续时间,会发生在泄漏率为 1kg/s 的区域之中。

不可控火灾是减压和/或排水系统不起作用的火灾。同样地,所显示的持续时间是最大的持续时间,会发生在泄漏率为 1kg/s 的区域之中。

图 14.11 所示为爆炸载荷的各种结果的概要,表示在受爆炸冲击的墙体上出现载荷(指超过设计基础的载荷)的频率。

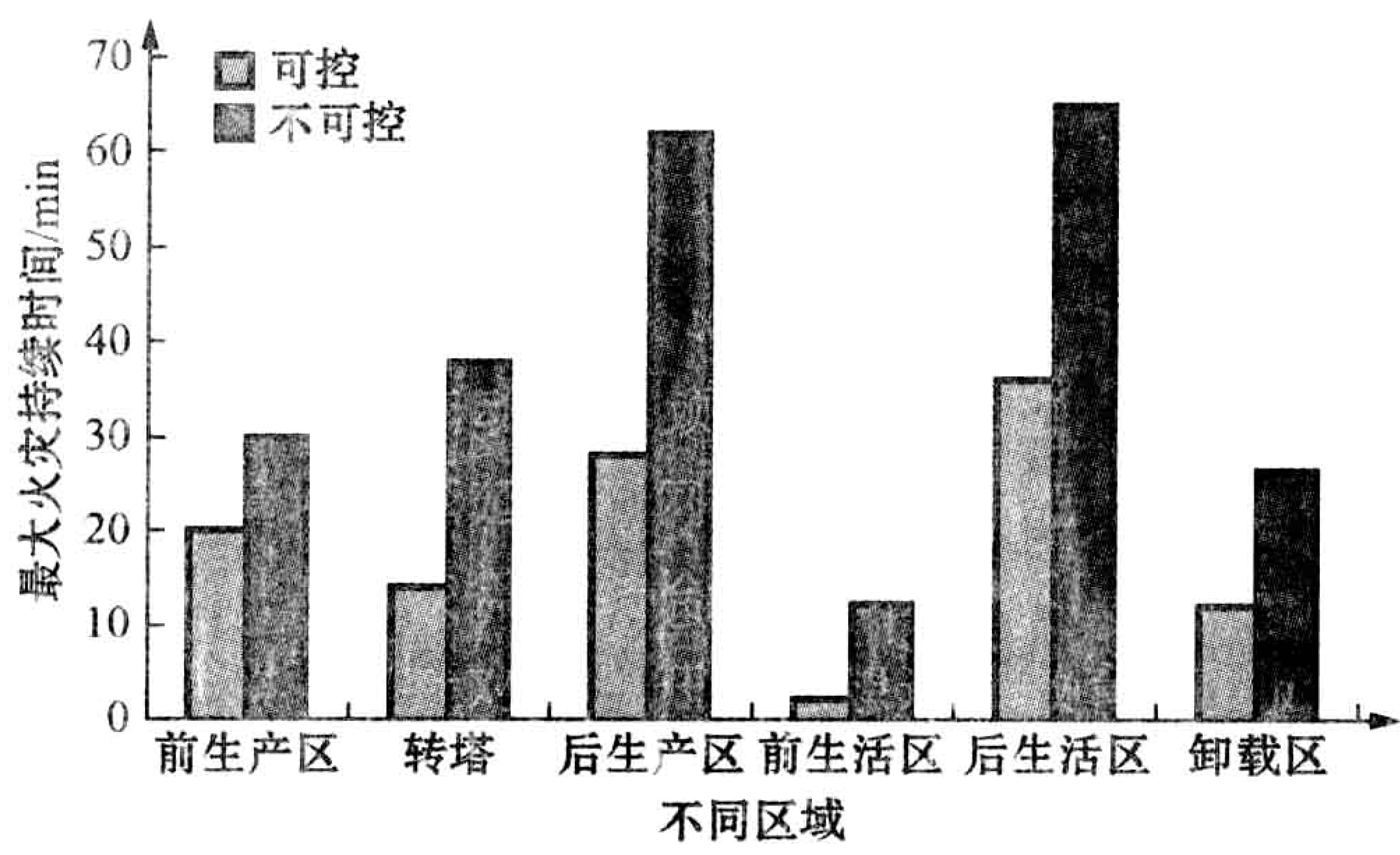


图 14.10　可控和不可火灾在不同区域中的持续时间

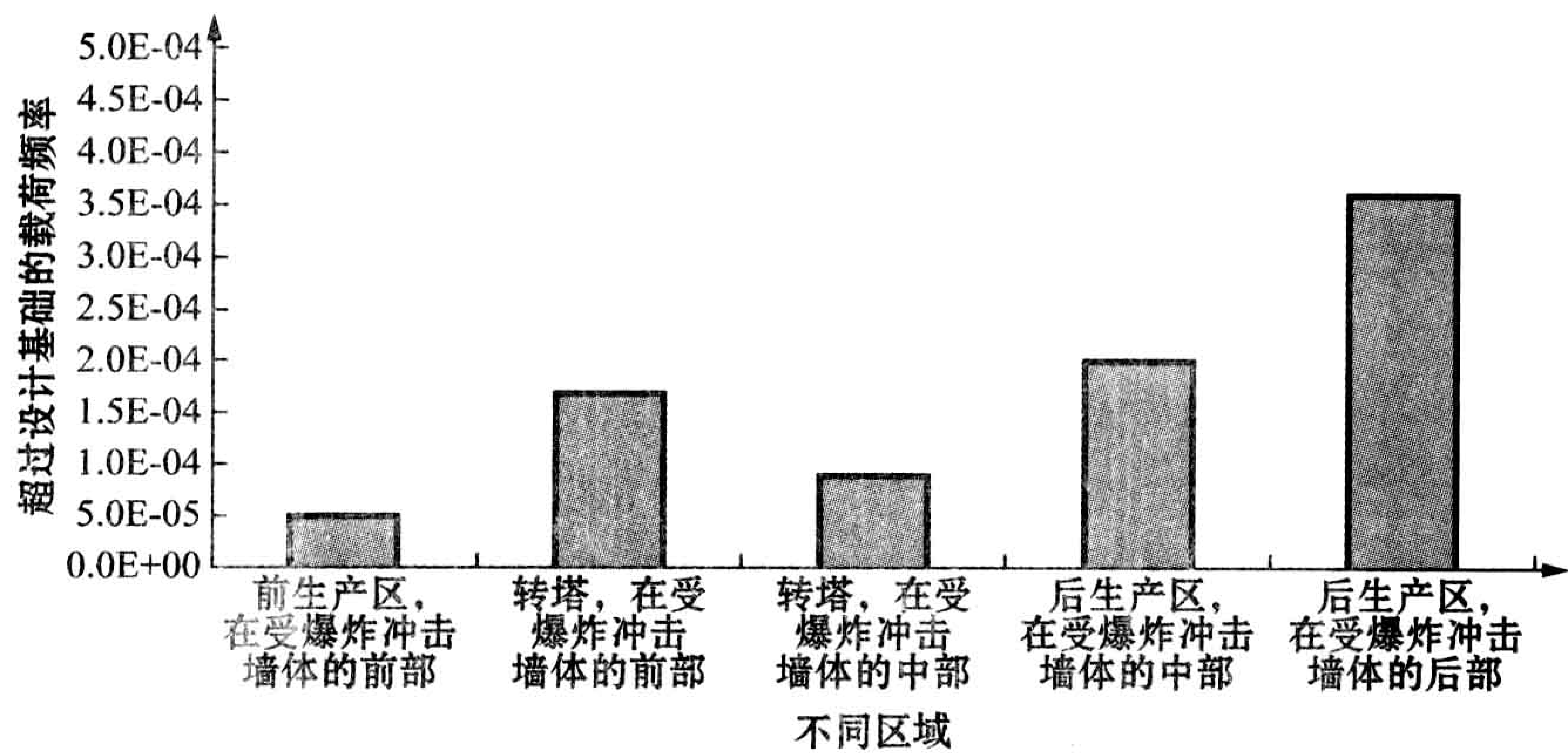


图 14.11　超过设计基础的爆炸频率

14.5　显著改进的呈现 Presentation of Significant Improvements

敏感性研究的一个特殊形式是呈现为了显著降低风险等级而要求进行的变化，就是说至少要有 50％的变化。图 14.12 所示为总风险结果，表明示以下显著改进的影响：

- 沿着船舶全长的逃生通道；
- “风险降低措施(RRM)2”。

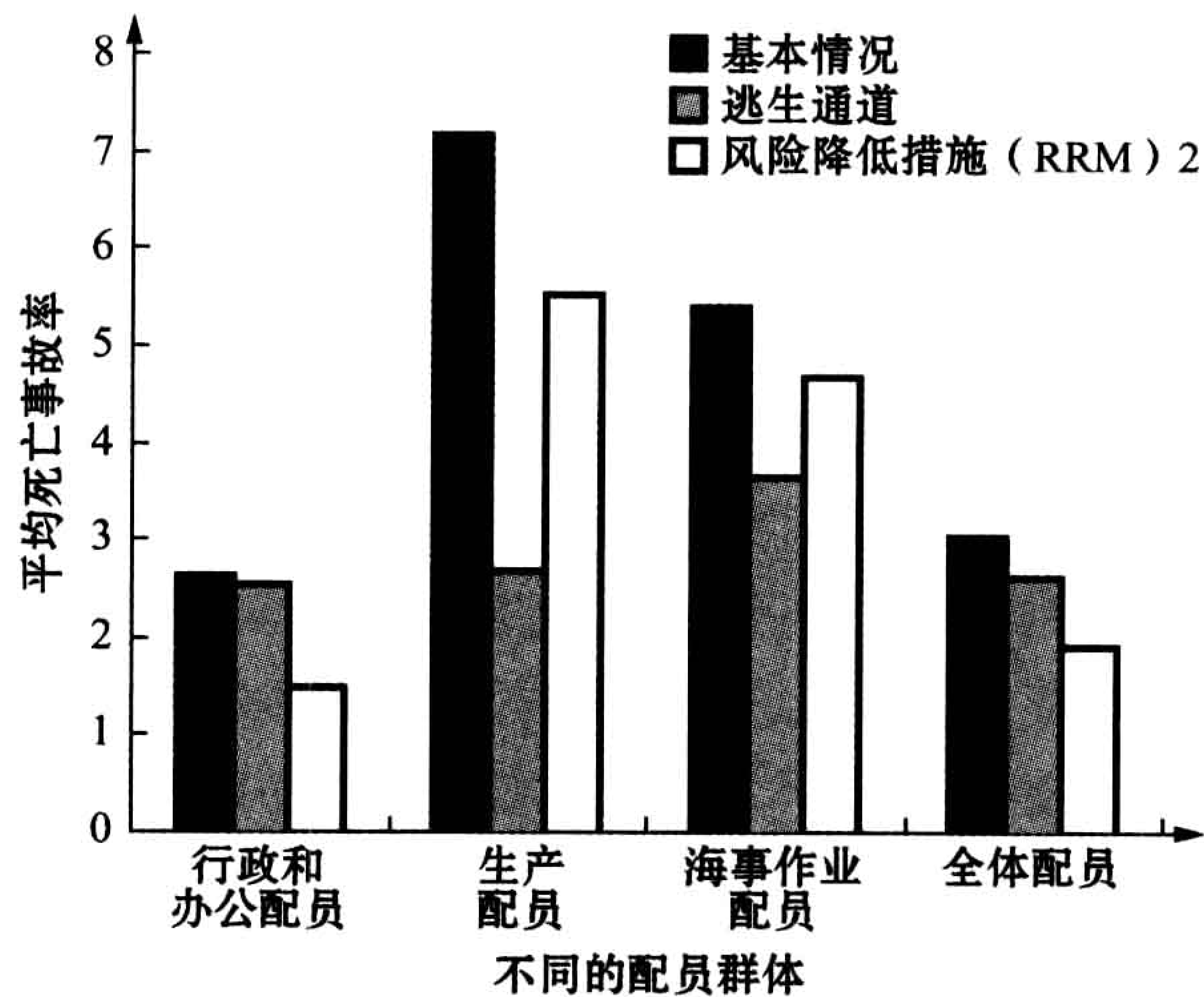


图 14.12　对源自显著改进的总风险结果的影响

仅有一个改进已被命名，而所显示的其他改进是一个表示为“风险降低措施(RRM)2”的假设情况。在真实的情况下，应当更加彻底地讨论所产生的影响。

14.6　敏感性研究的呈现 Presentation of Sensitivity Studies

敏感性研究至少对两个用途至关重要。这是根据挪威的健康、环境与安全(HES)管理规范而要求的，为的是说明结果的多变性，以作为输入数据的多变性函数。这有益于阐明风险模型的鲁棒性，对于说明不确定性也是如此。根据规范要求对不确定性进行评价，而敏感性研究则提供了一个服从这种要求的好方式。这样的敏感性研究还应当呈现由于前提和假设的变化而引起的对结果

的影响。

如果作出涉及安全系统和/或应急预案行动及计划的改进，那么敏感性研究的另一重要作用就是说明风险水平是如何变化的。

图 14.13 所示为一种说明不同区域和基本安全系统的敏感性研究结果的方式。输入数据的变化是系数为 2.0 的安全系统的无效性有了增加。图 14.13 的基础是海上设施上涵盖以下安全系统的平均死亡事故率(FAR)的相关数值：

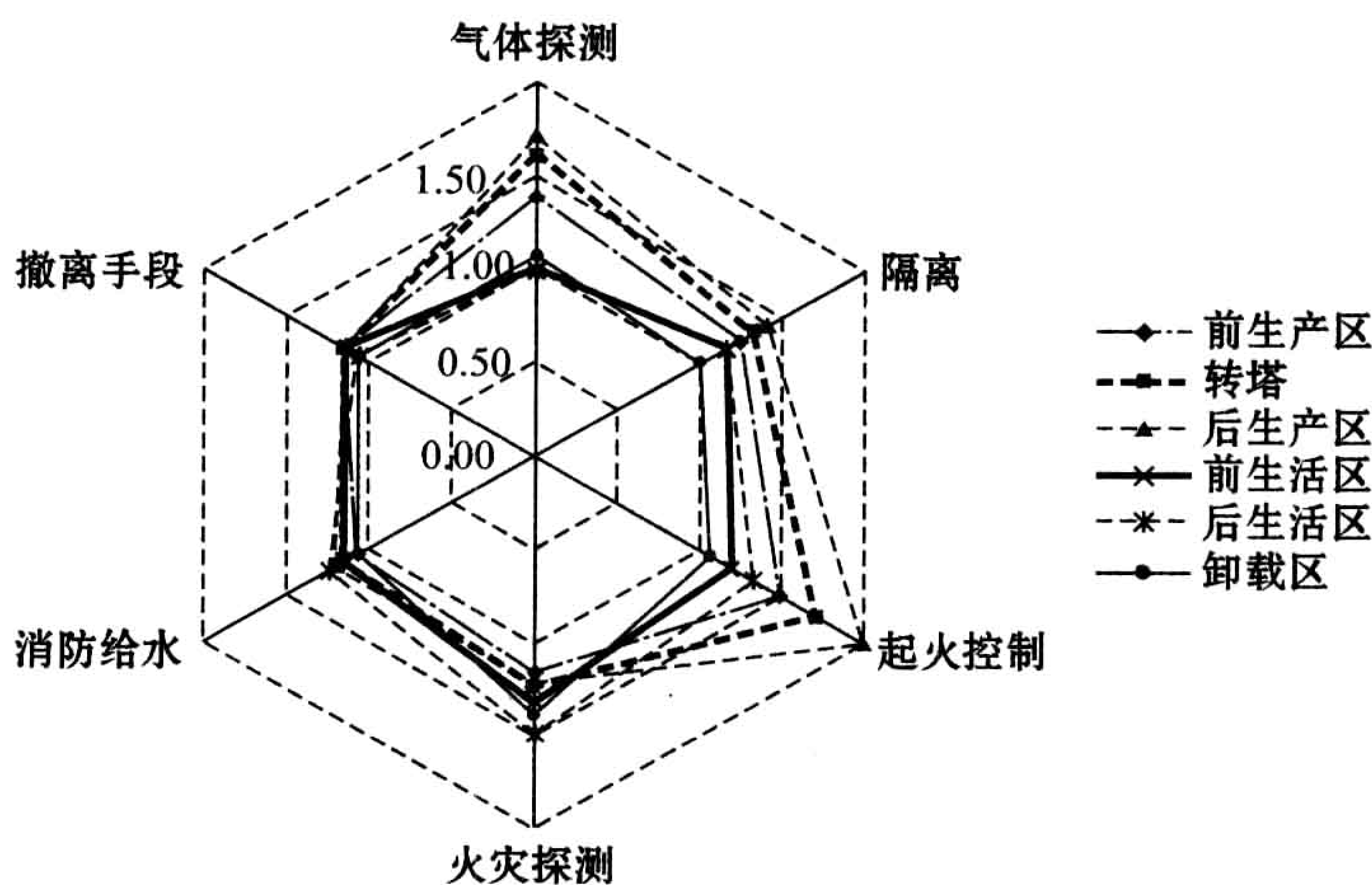


图 14.13　在设有基本安全系统的不同区域中平均死亡事故率(FAR)数值的敏感性研究结果的呈现

- 气体探测；
- 隔离(包括放空)；
- 起火控制；
- 火灾探测；
- 消防给水；
- 撤离系统。

如上所述，图中所示有 6 种不同的敏感性。所示内容为每一种敏感性对海上设施上 6 个不同区域的影响。例如，在“后”生产区模块，气体探测的无效性其系数减少了 5，指的是根据图 14.13 不可控火灾的频率其系数降低了 1.75。随着起火控制的失效频率有类似的降低，在“后生产”区的不可控火灾的频率降

低了 2,而在卸载区的不可控火灾的频率降得最少,约为 1.1。

图 14.13 中的数值是假设的,但一般趋势正如预期的一样,例如起火控制可用性的变体方案具有最大的影响力,而某些其他系统的变化影响则相对较低。在真实的情况下,更应彻底讨论此类影响。

图 14.14 所示为不可控火灾频率的敏感性研究结果,是指系数为 4.0 的安全系统的无效性有了增加。它说明,在考虑不可控火灾时,与使用死亡事故风险的时候作比较,一般来说大多数安全系统都具有比较大的影响。

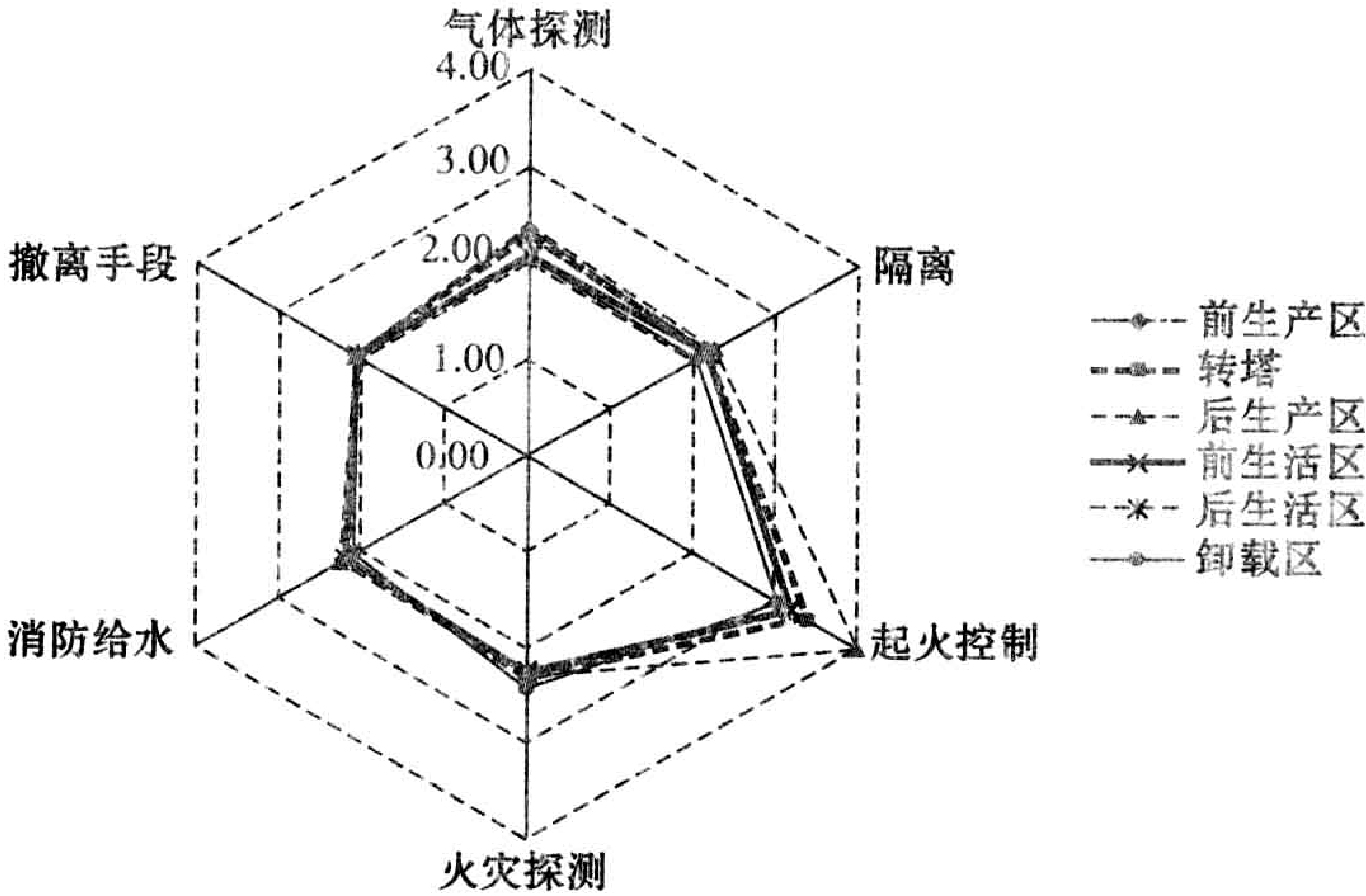


图 14.14 在设有基本安全系统的不同区域中不可控火灾频率的敏感性研究结果的呈现

在真实的情况下,应彻底讨论图 14.14 中的各种影响,但由于是假设数据而在此略去。

图 14.15 所示为人、技术和组织(MTO)视角下作业改进的敏感性研究结果以及假设的影响。所考虑的改进内容:

- 提高生产设备的维护程度;
- 提高生产区中安全系统的维护程度;
- 提高生产区中工艺人员的配员水平;
- 提高生产人员的技能;
- 用生产区中的雇佣人员取代承包人;

● 改善工艺区中对人工干预的监管。

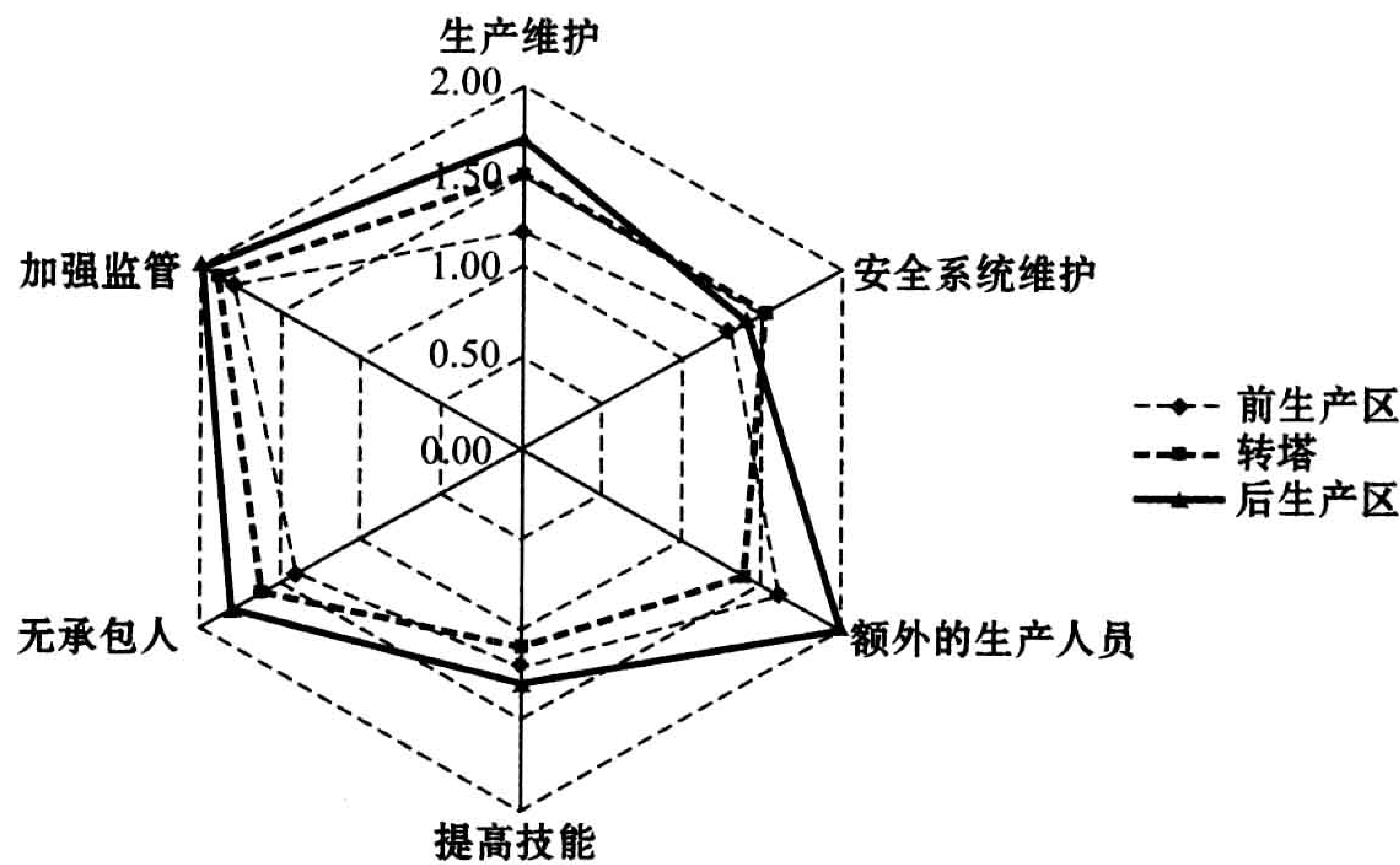


图 14.15　在有不同作业改进的不同区域中总泄漏频率的敏感性研究结果的呈现

应该强调的是，图 14.15 中显示的结果是假设值，但它们是可以用合适建模获取结果的例子。由于在这种情况下的结果是假设的，所以量化这些变化的方式就不予详细说明。技能和监管这两项的强化最难以量化，但总是能办到的。

14.7　不确定性的评价 Evaluation of Uncertainty

根据第 576 页源自管理规范的监管要求，需要对不确定性作出评价。不确定性的评价将取决于所采用的统计方法。在 Aven and Vinnem (2007) 中讨论的是经典法和贝叶斯法。本书采用贝叶斯法来考量风险。

经典法假设存在着一个“真实”的风险值，并假设不确定性可以通过围绕预期值的分布而表述出来，然后加以确定。

贝叶斯法则基于一个前提，即风险表述是关于涉及意外事故和死亡事故的

未来经验所寓意的不确定性的特征。因此没有其他的不确定性特征是合适的。

为了说明风险量化时各种参数受到各种不同前提和假设的最广泛的影响，可以使用第 14.6 节所述的敏感性研究，如图 14.13、图 14.14 和图 14.15 所示。请考虑下文的说明。

图 14.13 所示为起火控制的失效概率对结果具有强烈的影响。同时，有关起火控制的经验数据在数量上少之又少，因而通常所能提供的只是小数据量。

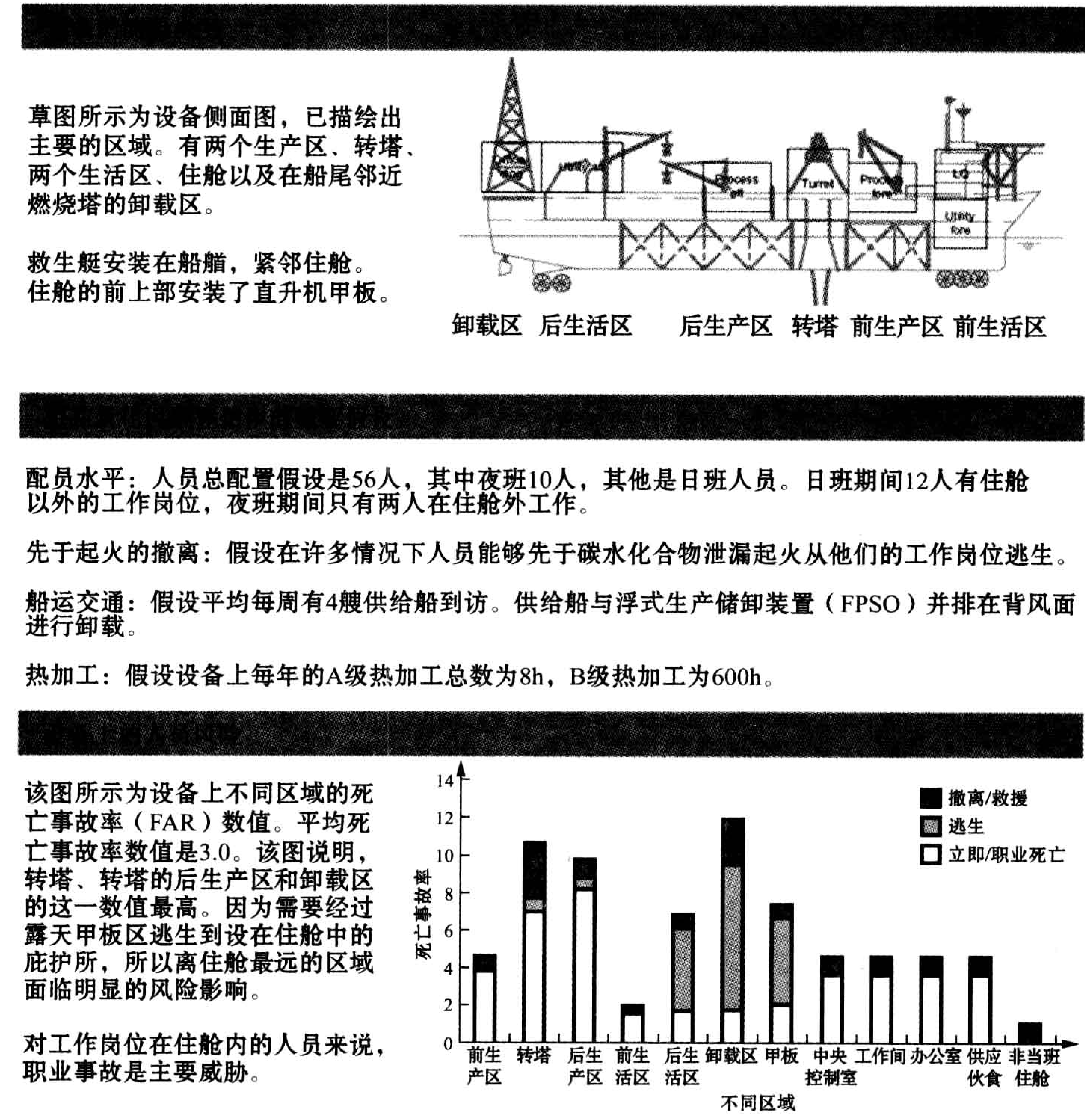


图 14.16 结果简化呈现的典型格式(来源:舍夫泰克公司)

所以起火控制的屏障功能是不确定性的主要来源之一，而该不确定性就是指碳水化合物泄漏在将来有多大可能会引起不可控火灾。

14.8　容易理解的呈现格式 Presentation Format for Easy Understanding

在最近几年间，为了开发出易于非专家群体理解的结果呈现格式，人们已经作出了许多努力。已有几种格式得以呈现，它们由简化的正文和图表组成。

图 14.16 改编自舍夫泰克-诺迪克公司的资料。在这个特定的例子中，虽然对主安全功能、资产和环境的风险可用同样的方式进行概述，但是仅列示了人员风险。

图 14.10 中所述的火灾和爆炸特征也可以同样的简化方式呈现出来，如图 14.16 所示。

第 15 章　营运阶段的风险分析应用

Use of Risk Analysis during Operations Phase

长期以来定量风险分析主要应用于设计阶段和进行大量改造工作。如果在营运阶段进行分析,方式类似于设计阶段,只是不必从健康、环境与安全(或者严格讲从重大危险风险)管理的角度反映设计和营运的巨大区别。过去 10 年里量化风险评估在营运阶段的应用增加了,并且开始以不同的方式实施,以反映出对于管理而言非常重要的一些区别,本章将论述与此相关的内容。

营运阶段风险评价的主要应用是定性评价以及审查和工作准备工具,本章也将进行简要介绍。

15.1　研究更新 Study Updating

15.1.1　概述 Overview

大多数分析师通常将研究更新同设计和施工建造阶段联系在一起,但这只不过是简单的涉及。在新开发的工程阶段中,研究更新将分为几个步骤进行实施。风险[及应急预案]分析的最终更新应持续到这些阶段结束。应急预案分析不是本书的主题,但为了保持完整性还是予以包括。工程阶段的研究更新通常涉及:

- 对量化风险分析进行更新以反映所选择的解决方案和系统;
- 以适当方式记录量化风险评估的假设,并作为随后应急预案分析的输入信息;
- [进行最终的应急预案分析;]
- [以适当方式记录应急预案分析的结果,包括在营运阶段应用的所有设计意外事件和已定义危险与事故状态、可能的原因以及事故的影响。]

营运阶段更新量化风险评估研究的需求由改造的程度所决定(关于实际改

造工作可见第 15.7 节）。这个阶段包括一般营运、检查、维护及有限改造。研究的目的是：

- 对风险[及应急预案]分析进行更新以确保能反映相关的技术和营运情况；
- 确保风险等级在可控的范围之内；
- 确保营运人员熟悉最重要的风险因素以及风险因素对达到可接受风险等级的重要性；
- 确保与正在进行的作业及工作任务相关的风险能够得到评估并实施必要的风险降低措施；
- 确保根据已更新的风险分析数据库、工具、方法和经验对风险等级进行监控。

当对营运安全至关重要的工作任务进行计划和准备时应进行定性研究。使用定性研究有几个正规的要求，比如安全工作分析。所有员工及其他营运人员能积极主动地参与这项工作是很重要的。

15.1.2 更新的范围 Scope of Updating

工程阶段的研究不应局限于海上生产设施，还应涵盖附近的船舶和海上设施，如果这些船舶和设备距离比较近，可能受到意外事故影响的话。

对风险[及应急预案]分析进行更新应确定进一步降低风险措施的需求，如应急预案措施，以及健康、环境与安全管理工作中应特别关注的范围。量化风险评估研究还应根据已发生的侥幸脱险和事故经验、组织变化和规范变化进行更新。此外分析更新还包括：

1）与工作发展保持一致的海上设施和作业活动。

2）先前分析使用的假设和前提，以及这些假设的进一步发展情况。

3）已经计划的作业或新设备所涉及风险是否能在早期阶段得到评估。

4）受到新经验、新知识或所使用数据库变化影响的数据基础，包括源自自身作业的经验数据修正。

5）使用的方法。

6）可能导致海上设施或作业的营运商/所有者风险接受准则发生改变的分析。

15.1.3 更新的频率 Frequency of Updating

营运商/船东应对量化风险分析及应急预案分析的更新频率制定最低要求，除非技术或营运环境要求更高的更新频率。

英国安全案例规范（HSE，2005c）对于更新安全案例及量化风险评估研究有着非常严格的要求。这体现在必须确保给予更新必要的关注，否则营运商经常会忽略量化风险评估研究的更新。

安全案例规范（HSE，2005c）的指导准则引用了“腊肠”原则，即许多小改造可以对风险等级逐渐产生非常大的总体影响。健康与安全管理局（HSE）严格要求的目的之一是确保不会忽略这种总体影响。

营运阶段更新工作的一个重要方面是反映出相关设备、设施和作业数据的特殊变化。如果利用了营运特殊数据就有可能使更新的风险等级得到降低。但当研究先于营运阶段进行时，经常有使用保守数据和假设的倾向。因而根据营运经验（见第 2.4.3 节）进行更新就可能得到更有代表性的风险等级。

但应说明的是进行这种更新后，实际的风险等级并未降低，产生的只是对风险等级更为保守的估计。

先前的安全案例规范（HSE，1992）要求安全案例（及相关的量化风险评估）的更新和重新提交间隔时间不能超过 3 年。每 3 年重新提交明显成为了管理机构的沉重负担，现在已经被每 5 年进行一次更为彻底、但无需重新提交的审查所替代，安全案例必须保持最新的要求仍然得到保留。

15.2 改进营运的屏障与营运风险分析 BORA Analysis of Operational Improvement

第 6.2.6.1 节概述了屏障与营运风险分析法。该方法的其中一个目的涉

及如何就改进营运进行分析,项目中一些案例研究的目的也在于此。

15.2.1 案例研究综述 Overview of Case Studies

作为屏障与营运风险分析方法发展的一个部分,需要计划和进行案例研究以探讨方法应用的效率、风险影响因素(RIF)状态评估信息源的可用性以及通过这些研究可达到的结果类型。在挪威需要对独立的海上生产设施进行案例研究,下面的案例研究1是针对有钢导管架支撑结构的旧设施,案例研究2则是针对相对比较新的浮式生产设施。案例研究对以下场景进行了详细分析:

- 案例研究1:
    - 场景A:因维修后阀门处于错误位置而导致泄漏;
    - 场景B:因维修过程中法兰或螺栓装配不当而导致泄漏;
    - 场景C:因内部腐蚀而导致泄漏;
    - 场景D:因外部腐蚀而导致泄漏(定性)。
- 案例研究2:
    - 场景A:因维修后阀门处于错误位置而导致泄漏;
    - 场景B:因碳氢化合物系统拆卸过程中或之前的失效而导致泄漏。

Sklet et al(2006)详细介绍了仅限于控制屏障的案例研究1,而案例研究2还考虑了一些后果屏障,如发生了碳氢化合物泄漏后用于限制其后果的屏障功能。

15.2.2 敏感性研究的结果 Results from Sensitivity Studies

屏障与营运风险分析方法的一个优点是为了降低风险,可以很容易进行敏感性研究以评价潜在行动的作用。表15.1概括了敏感性研究的一些结果,可用于说明如何进行这种研究。

表 15.1 敏感性研究结果的说明——概率降低到初始值 1/10 所产生的影响

参 数	场景 A	场景 B
当不使用隔离方案时，检查装置没有发现阀门处于错误位置的概率	0.20	
如果实施了控制工作，维修后检查装置没有发现阀门处于错误位置的概率	0.11	
未能正确实施方案的概率		0.12
增压系统检测失效的概率		0.10

场景 A 的数值 0.20 意味着当不使用隔离方案时，如果检查装置没有发现阀门处于错误位置的概率可以降低到初始值的 1/10，那么在对概率不做其他改变的情况下，由场景 A 所导致的泄漏概率可以降低到初始值的 1/5（或降低为初始值的 20%）。表 15.1 显示了案例研究考虑的两个场景中影响最大的数值。

15.3 敏感性研究应用于安全系统改进 Use of Sensitivity Studies for Safety Systems Improvement

在弗丽嘉中央综合设施（FCC）安全案例更新之前就发现需要对消防给水重新进行评估（Vinnem et al.，1996b），这是因需要在其中一个平台安装更多设备所致。为了减少对消防给水的需求，决定为称为“TCP2”的处理平台增加消防隔离区。即便如此，仍然需要增加新的消防给水设备。必须将整个弗丽嘉中央综合设施的消防给水量增加到 46 000L/min，几乎是以前的一倍。弗丽嘉中央综合设施由 3 个通过桥互相连接的海上设施组成：TCP2 生产平台、TP1 立管平台及 QP 居住平台。

离岸业对陈旧设施进行类似升级工作的经验表明，这种改进常常会对其他安全系统和功能产生连锁效应（通过防火墙进行区域隔离有时可能导致通风问题）。因而决定对 TCP2 的所有安全系统进行评价以确定是否需要实施进一步的升级工作，并确保不会产生不必要的负面影响。

后来发现几个其他安全系统和功能也需要升级，导致需进行比较研究以评

估降低风险的可能性。比较研究在专家支持下实施,计算工作包括了爆炸仿真和结构火灾响应。Vinnem et al.(1996b)概述了这些研究中所进行的一些工作。

15.3.1 风险管理目标 Risk Management Objectives

TCP2 平台是弗丽嘉中央综合设施的主要生产加工平台,设计于 20 世纪 70 年代中期,当时的离岸安全标准与现行标准相比是大相径庭的。挪威法规一般不要求为了符合目前的标准而对陈旧设施的技术设备进行升级。

但英国要求所有平台都必须遵从基于风险的安全方法,即通过安全案例来说明人员风险符合最低合理可行原则,而不论平台的使用年限。挪威也有类似的要求,必须说明对于公司的风险接受准则而言,风险等级是可接受的。出于以下目的对弗丽嘉海上设施的设备升级进行了风险量化,这些目的将在后面的章节中进一步介绍:

- 确定必需的风险降低范围;
- 选择技术和程序性措施的正确组合;
- 说明风险符合最低合理可行原则。

15.3.1.1 确定必需的风险降低范围 Decision on Necessary Risk Reduction

当弗丽嘉油田接近规划的生命周期终点时,在需要提高安全等级和理性看待油田经济之间保持平衡是非常困难的,因而对必要而足够的风险降低范围进行决策是一项需要投入大量精力的工作。相对比较好的方法是要求对任何风险降低行动的价值进行确定。敏感性研究的结果证明了决策的困难,如图 13.1 所示。

图 13.1 显示了当事件树的特定参数值改变为初始值 50%时对风险等级的影响。高温作业减少 50%意味着人员立即死亡风险可降低约 18%,重大物资损失频率也可降低约 32%。考虑的因素中只有两个能对人员的风险等级产生明显的影响,即减少高温作业和降低爆炸过压。

对于弗丽嘉海上设施而言，决定哪些安全系统需要改善更为困难，因为最初的安全案例显示人员的风险等级非常低（见 Vinnem et al.，1996b），特别是考虑到海上设施的使用年限时。但可以预见因陈旧设施损坏而导致资产损失的风险也会高得多。

15.3.1.2　技术措施与程序性措施 Technical vs Procedural Measures

如果不投入效益难以论证的大量费用，对已有海上设施进行技术改造常常受到限制。

虽然程序性风险降低措施常常能以最低的初始费用开始实施，但这些程序通常只能影响有限的范围。此外这种改进存在的问题是程序按计划完成风险降低的可靠性并不确定，当程序在紧急情况下用于控制行动时尤其如此。这种措施的一个例子是开始进行人工放空所需的响应时间。

在本章所讨论的情况下，从一开始就非常强调不进行下一步的类似优化。通过使用对通风产生最小影响的布置避免了隔离区对通风的潜在负面影响。

15.3.2　案例研究：放空改进的效果 Case Study：Effect of Improved Blowdown

1995 年在 TCP2 生产平台上安装了同新石油加工模块连接的新火炬塔，可以减少 TCP2 旧平台的放空时间。但在有些情况下耗时比较长，并不符合现行的规范。

但是对生产过程的研究表明限制放空流将涉及阀门和管系系统，如果要真正减少放空时间，必须大量更换阀门和管系系统。在生产中的平台上进行这种更换是非常昂贵的，而且还需要一定时间的完全停工。

这种放空改造的另一个重要影响是需要进行大量的焊接和切割高温作业。而这本身就是主要风险源之一，应引起相当的关注。

因而放空改进就需要更深入的考虑，将总体目标同成本收益及离岸施工增加的风险进行比较，所以必须对降低风险的潜力进行量化。

15.3.2.1　改进的潜力 Improvement Potential

应注意作为一个小例外，从新卫星油田接受油气的生产设备的放空时间要

符合现行规范，如能够在 15min 之内将压力降低到 7bar 以下（或初始值的一半）。

在定性基础上可以注意到放空能减少火灾的持续时间，因而也就可以降低火灾从最初生产模块部分蔓延的可能性。但火灾最初几分钟的发展几乎不受放空的影响。

由于 TCP2 平台是通过桥与弗丽嘉中央综合设施的其他平台连接，而量化风险评估证明几乎所有（99%）的人员风险都发生开始的 5min 内，所以放空系统的改进对人员风险不会产生影响，因而主要工作就放在对物资损失风险的评价上。

15.3.2.2 考虑的案例 Cases Considered

根据系统的最初情况，对改进放空系统的两个可能案例进行了考虑：

- 对于适用的所有部分，放空时间都减少到 15min（7bar）。
- 对于量化风险评估确定的 4 个最关键部分，如火灾频率最高的部分，放空时间减少到 7.5min。在这种情况下，其他部分保持原来的放空时间不变。

这些情况下的火灾行为和持续时间都直接在流体计算中建模，无须更多关注。但为了能真正反映出所研究案例的区别，还是需要对火灾从一个部分到另一个部分的蔓延进行非常详细的建模。下文将对火灾蔓延模型所需的进一步发展进行说明。

应说明的是无须对爆炸导致的火灾蔓延情况进行考虑。这个有些简化和保守的模型假设过压在达到 0.3bar 或更高时会立即发生管道破裂并导致火灾蔓延。

15.3.2.3 火灾蔓延建模 Modelling of Fire Escalation

为确定因为火场中的管道失效而导致的蔓延何时发生，需要对典型的管道尺寸进行非线性结构分析，如第 6.9.1 节所述。

15.3.2.4 结果和评价 Results and Evaluation

研究发现减少放空时间只能对资产风险产生很小的影响，平台全损频率降低了不到 2%。结果有些令人惊讶，考虑到 TCP2 平台的特殊情况会对这些结果产生影响，因而需对此进行一些说明。

首先应说明的是平台主要为开放布局，各部分和系统之间没有明确的分隔。这意味着一个部分发生的火灾很可能会影响另一个系统的小尺寸管道，并且在很短的时间内导致失效(大约 2～5min，见图 6.27)，无论放空时间是 7.5min还是 15min。

为了通过放空来有效控制火灾的蔓延，放空时间必须在 5min 之内。作为选择，更长的放空时间可同小口径管道的被动消防结合起来。在本章的案例中，实施这些行动都不太现实或经济。还应注意到事故升级受爆炸过压的影响非常大，实际上这才是对 TCP2 平台最为重要的。

因而评价的结论就是放空系统改进措施的成本同可预期的收益明显不成比例。对于人员风险而言这是很明显的，而将经济收益同成本进行比较后还可以说明资产风险的情况也是如此。经济收益指事故损失减少(因火灾持续时间更短)及重建时间缩短。因而决定对 TCP2 平台采取弥补措施，除了更换一个放空阀外，放空系统基本保留原先的状态。

做出这个明确的结论并没有考虑如果实施改造工作的话，高温作业带来的风险增加。后来计算出每增加或减少 1000h 高温作业的风险变化情况如下：

- 平均个体风险为 7.4%；
- 严重/较大损失频率为 13%；
- 全损频率为 7.0%。

这意味着如果改进放空系统所需的明火高温作业时间超过 1000h，那么几年以后总累积影响才确实是降低风险。

所选择的弥补措施是通过大量移除覆盖外墙来增加防爆通风区。计算流体力学爆炸仿真和通风研究表明这可以对爆炸过压和通风率产生很好的影响。

15.4 成本收益分析案例研究 Case Study Cost Benefit Analysis

成本收益分析的一些原则将通过案例研究进行说明，研究重点为是否需要提供额外的被动消防。但应强调的是要论证最低合理可行原则(ALARP)，考虑的范围将远远超过只进行成本效益分析，见 Aven and Vinnem(2007)。

应注意的是案例撰写于 1998 年，当时将 2000 年后视为“将来”，本书这一版没有对此进行改动。

15.4.1 油田数据 Field Data

首先需要对油田的总体情况进行说明。图 15.1 显示了石油生产情况(不考虑气体生产)及假定的油价曲线。4 年生产稳定期后产量急速下降，可能是产水增加的缘故。

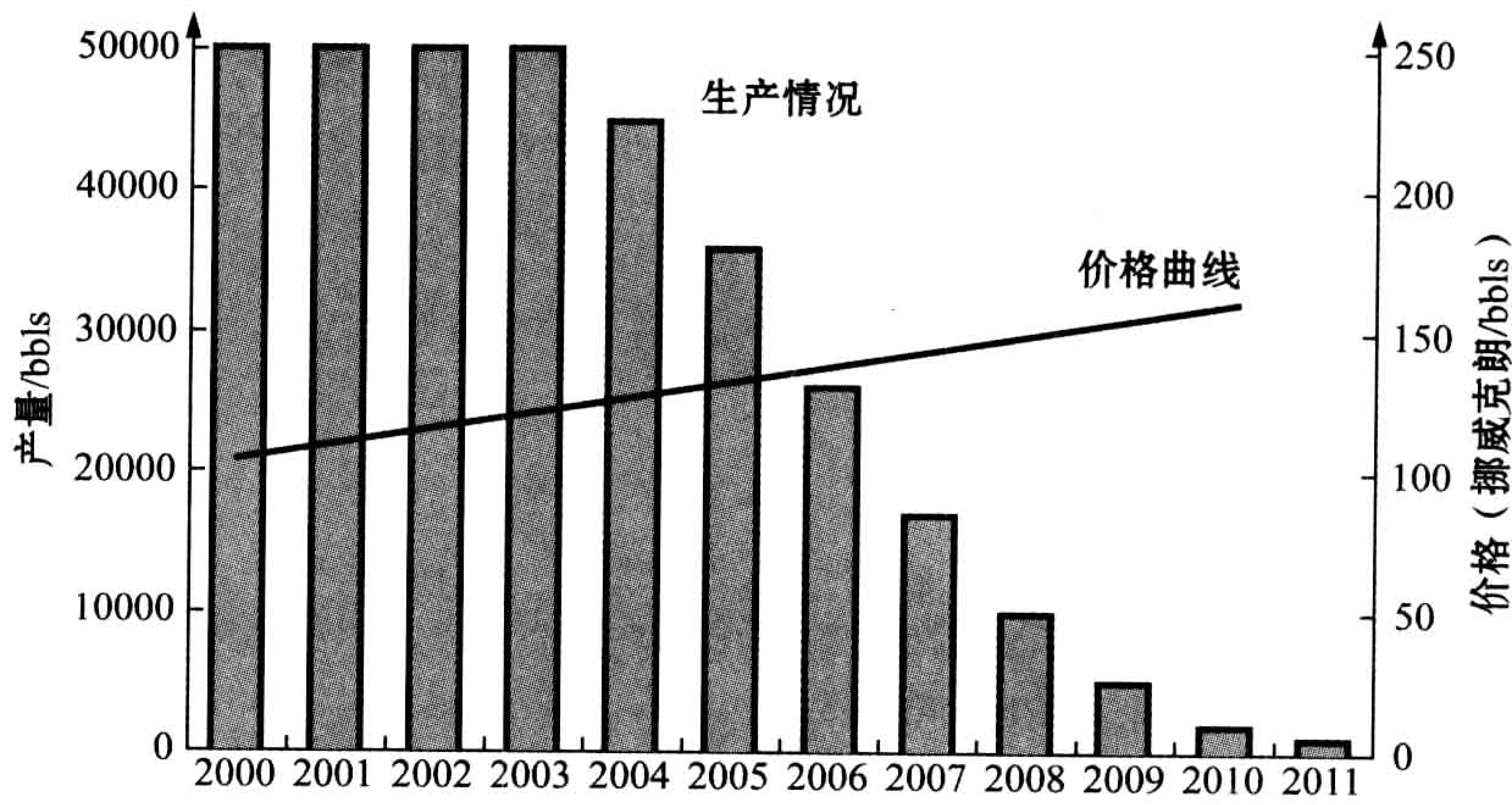


图 15.1 石油生产情况及假定油价曲线

图 15.2 对基准情况生产曲线与 2003 年延期 1 年的生产曲线进行了比较。稳定的生产水平延续到 2004 年，随后的生产曲线将向右移动一年，如 2008 年的延期生产量对应于 2007 年的不延期生产量。

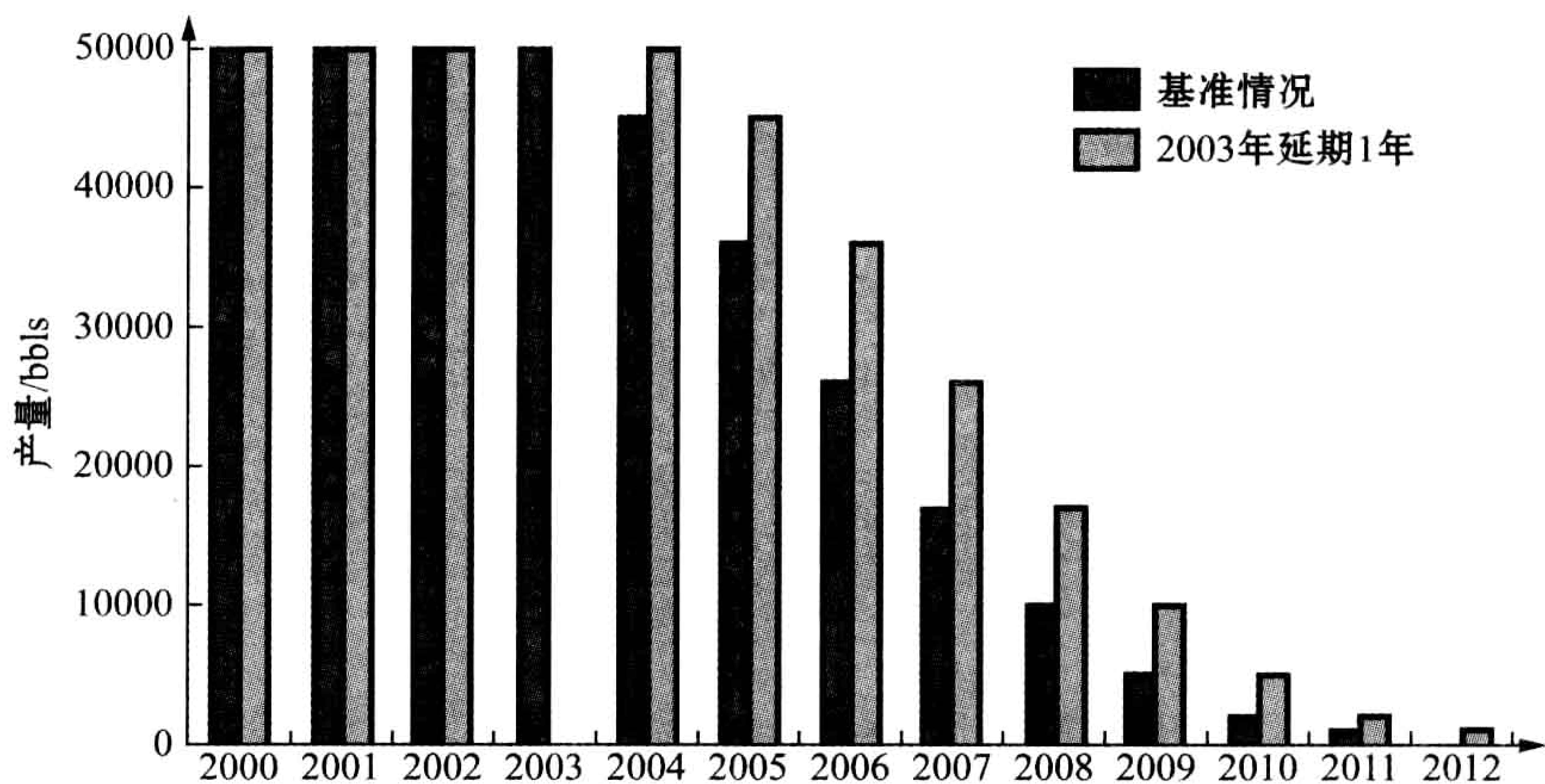


图 15.2　基准情况生产曲线与 2003 年延期 1 年的生产曲线

这里考虑的经济价值是生产延期及延期生产相同数量石油所导致的利息损失，计算中所用的利率为 10%。应说明的是本例中并没有包括成本膨胀。

表 15.2 显示了不同类型物资损失的经济影响，使用了 4 种物资损失类型（表 15.2 只显示了中间两种）：

- 轻微：局部设备；
- 较大：一个模块；
- 严重：两个或更多模块；
- 全部：整个平台。

表 15.2　物资损失情况

损失类型	重建成本/百万挪威克朗	全部生产延误/月
较大	300	3
严重	1 500	12

15.4.2 降低风险措施的定义 Definition of Risk Reducing Measure

所考虑的降低风险措施是将被动消防应用于平台结构中被认为是最关键的部分。实施降低风险措施的费用如下：

- 投资费用:600 万挪威克朗；
- 年检查费用:6 万挪威克朗。

15.4.3 降低风险的潜力 Risk Reducing Potentials

在一些事故场景中,降低风险措施能使损失从“严重”(对于几个模块)降低为“较大”(对于一个模块),而且年潜在人命丧失也有小幅减少。损失频率的变化情况如下：

- 严重损失频率降低为：　　每年 $5 \cdot 10^{-4}$；
- 较大损失频率增加为：　　每年 $5 \cdot 10^{-4}$；
- 年潜在人命丧失降低为：　每年 $3.5 \cdot 10^{-3}$。

所有变化都非常有限(小于平台总数值的 10%),对于环境风险等级没有什么影响。

15.4.4 成本与收益比较的整体方法 Overall Approach to Comparison of Costs and Benefits

如果风险等级在最低合理可行原则图上位于“不可接受”或“可以接受”区域内,那么就不需要做进一步考虑。假设风险等级不在这两个区域内,成本与收益比较的整体方法可概述如下：

- 确定降低风险措施是否依据了良好的设计或作业实践。如果降低风险措施符合良好的作业实践,并且成本也有限的话(介绍的案例是 600 万

挪威克朗)，那么就可以断定措施应该得到实施；

- 如果没有明确要求措施必须符合良好的作业实践，或认为成本过于昂贵的话，就需要使用成本收益方法；
- 首先对物资损失和生产延期进行成本收益分析；
- 如果经济收益超过成本，那么降低风险措施就应该实施而不用进一步考虑人员风险；
- 如果成本超过经济收益，就要计算净现成本(NPV)并同油田生命周期的潜在人命丧失总体变化情况进行比较；
- 统计学上每避免一起死亡事故的成本必须予以考虑。如果成本与收益相比明显不成比例，那么就不应实施降低风险措施。

如果降低风险措施包含了环境方面的内容，就应该在考虑物资损失之后，考虑人员风险之前将溢油的经济价值整合到计算中。成本中不包括保险、税收节减和股东份额，这些可视为社会因素。应注意的是并没有考虑失去信誉及无法履行合同义务等情况。当成本和收益关系比较特殊时应注意以下情况，这将通过一个例子加以说明。

一个油田通常由 4～6 个公司所组成的合作集团所拥有，而油田营运商可能只有 30%的油田所有权(或者更少)。石油业的利润缴税一般非常高，比如可达 60%～80%。如果所有权为 30%，缴税为 70%，那么营运商无疑只需承担任何支出的 9%(假定有年利润)。但如果决定不实施特定的风险降低措施却发生了措施本可以排除(或减少)的事故，油田营运商将很可能承担媒体和舆论的所有“谴责”。

因而实施风险降低措施通常是最能符合油田营运商利益的。

另一方面，发生事故后因税收减少，政府常常是主要损失者。但这是无法提供保险的，这也是为什么应在社会环境中考虑风险降低措施并且不考虑税收和保险问题的另一个原因。

15.4.5　收益建模 Modelling of Benefits

表 15.3 显示了根据事故发生的年份，油田整个生命周期生产成本的相对变化情况。

表 15.3 根据“较大”和“严重”损失事故发生的年份，油田整个生命周期生产成本的变化情况

	年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
较大事故	2000	423.8	0	0	−56.3	−87.8							
	2001		429.4	0	−56.3	−87.8	0						
	2002			435	−56.3	−87.8	0	0					
	2003				426.6	−131.6	0	0	0				
	2004					405.3	−109.4	0	0	0			
	2005						379	−81.9	0	0	0		
	2006							353.6	−55.5	0	0	0	
	2007								332.6	−33.8	0	0	
	2008									316.9	−17.44	0	
	2009										306.98	14.4	
	2010											303.6	
严重事故发生年份	2000	3507	0	0	−228.1	−427.1	−492.8	−459.9	−370.5	−273.8	−169.7	−58.4	−60.2
	2001		3598.8	0	−228.1	−427.1	−492.8	−459.9	−370.5	−273.8	−169.7	−58.4	−60.2
	2002			3690	−228.1	−427.1	−492.8	−459.9	−370.5	−273.8	−169.7	−58.4	−60.2
	2003				3553	−664.3	−1183	−357.7	0	0	0	0	0
	2004					3208	−1183	−613.2	0	0	0	0	0
	2005						2781.2	−1329	0	0	0	0	0
	2006							2369	−899.7	0	0	0	0
	2007								2029	−547.5	0	0	0
	2008									1773	−282.9	0	0
	2009										1613	58.4	0
	2010											1558	0

对于造成较大损害的事故，其发生当年的损失是非常大的。损失产量（事故发生当年）的价值随生产稳定期假定油价的升高而增加，但当年产量比较低的话则会减少。在大多数情况下，延期生产损失的面值要更高，因为假定油价是上涨的。

如果在生产稳定期发生损失，那么损失的产量只有在生产稳定期结束后才能得到弥补。严重损失的特别成本是物资损失加上损失产量的价值。这将导致生产稳定期后增加产量并在生产周期的随后若干年里提供额外的收入。损失产量（事故发生当年）的价值随生产稳定期假定油价的升高而增加，但当年产量比较低的话则会减少。作为说明，2001 年的数值可计算如下：

- 较大损失：
  - 直接费用 3 亿挪威克朗；
  - 每天损失产量 12 500bbls，每桶价值 110 挪威克朗，90 天共计 1.2375 亿挪威克朗。
- 严重损失：
  - 直接费用 15 亿挪威克朗；
  - 每天损失产量 5 万 bbls，每桶价值 110 挪威克朗，365 天共计 20.075 亿挪威克朗。

在发生较大损失的情况下，生产稳定期结束后会进行延期生产，将稳定的生产水平再延长一年以增加产量。表中可见与 2001 年生产损失 1.237 5 亿挪威克朗相比，2003 年和 2004 年的数值（负损失，如额外收入）包含了 1.44 亿挪威克朗额外收入（因不考虑通货膨胀，所以都取 2000 年的数值）。

表中的数据说明事故发生于考虑年份的伊始，对计算的改进是假定事故可以发生于年中。

为了得出预期值，可以将两种损失类型的数值都乘以年频率的变化值，如表 15.4 所示。

最后还对生产的净现值变化情况进行了计算，见表 15.4。表 15.5 显示了计算得到的净现值。这些期望值针对每年发生的事故进行计算，因而是附加的。

表 15.4 每年预期的损失(收入)变化情况,根据事故发生的年份

预期值,成本变化/百万挪威克朗	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
2000	−1.54	0	0	0.09	0.167	0.246	0.23	0.185	0.137	0.09	0.03	0.03
2001	0	−1.59	0	0.09	0.167	0.246	0.23	0.185	0.137	0.09	0.03	0.03
2002	0	0	−1.63	0.09	0.167	0.246	0.23	0.185	0.137	0.09	0.03	0.03
2003	0	0	0	−1.56	0.266	0.591	0.179	0	0	0	0	0
2004	0	0	0	0	−1.4	0.537	0.307	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	0	−1.2	0.623	0	0	0	0	0
2006	0	0	0	0	0	0	−1.01	0.422	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	−0.85	0.257	0	0	0
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	−0.73	0.133	0	0
2009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	−0.65	0.02	0
2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	−0.63	0

表 15.5 中的累积收益是 467 万挪威克朗，这就是风险降低措施的经济收益。

15.4.6 成本建模 Modelling of Costs

最初的投资成本是 600 万挪威克朗，每年的营运成本是 6 万挪威克朗。针对营运成本为 53 万挪威克朗计算净现值，所以降低风险措施的总成本就是 653 万挪威克朗。

表 15.5　每年的净现值

年	相对净现值/百万挪威克朗	年份	相对净现值/百万挪威克朗
2000	−0.784	2006	−0.320
2001	−0.692	2007	−0.287
2002	−0.605	2008	−0.258
2003	−0.477	2009	−0.260
2004	−0.410	2010	−0.220
2005	−0.358		

15.4.7 结果 Results

现在可以在经济基础上进行以下比较（都基于净现值）：

- 收益：467 万挪威克朗；
- 成本：653 万挪威克朗。

因而净投资为 186 万挪威克朗（净现值）。对应的潜在人命丧失值每年可降低 0.0035，或 12 年可避免 0.042 起死亡事故，这相当于统计学上每避免一起死亡事故需投资 4 430 万挪威克朗。图 15.3 说明了根据计算中所使用的利率，对净投资的变化情况及油田生命周期内统计学上每避免一起死亡事故的投资

比例所进行的敏感性分析。

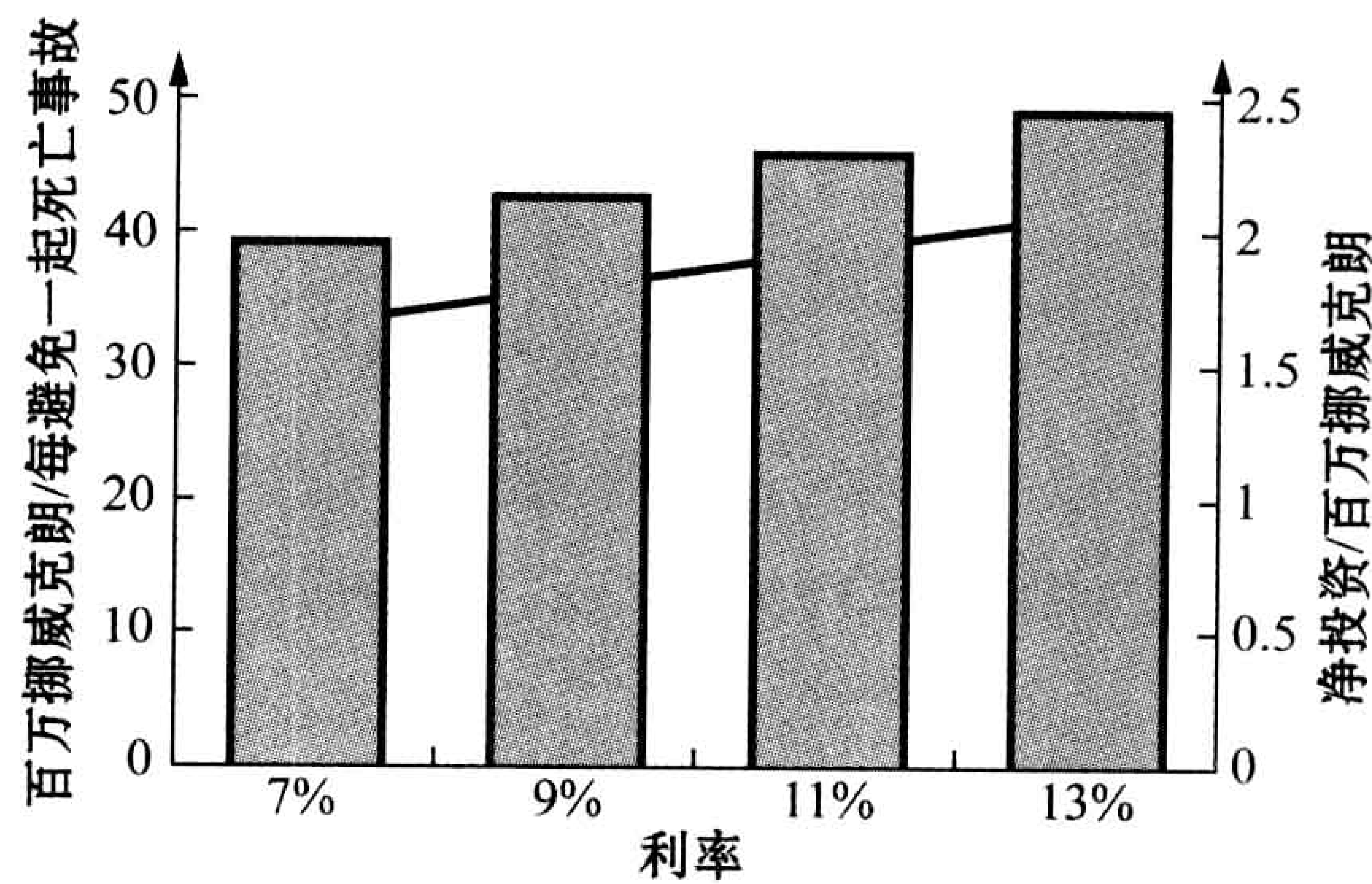


图 15.3 不同利率水平的敏感性研究

从图中可以看出当利率从 7%上升到 13%时，每避免一起死亡事故的投资额只增加了 25%，即从约 4 000 万挪威克朗增加到约 5 000 万挪威克朗，这表明计算对于利率不是非常敏感。需进一步说明的是还应该进行其他敏感性研究。

15.4.8 讨论与评价 Discussion and Evaluation

应说明的是此处的成本收益评价有些特殊，特殊之处在于：

- 所有的成本都是确定的，如必须承担的成本，主要是需提前支付的成本；
- 收益是概率性的，并在预期值的基础上进行考虑；
- 在油田生命周期内，单一设施的收益能够实现的概率大约为 1%；
- 对于单一设施，实施降低风险措施有两种结果。要么没有发生事故（可能性非常高），降低风险措施的投资完全损失；要么发生了事故（可能性非常低），事故成本可以大大得到降低。

使用成本收益方法的条件如下：

- 只有当营运商拥有非常多的相应海上设施时，方法才是严格有效的；
- 假定营运商财政上能够应付名义损失最大的年份。

尽管存在这些限制，成本收益分析被认为是对可能的风险降低措施的经济价值进行客观分析的唯一方法。

15.4.9　结论
Conclusions

本案例研究中统计学上每避免一起死亡事故的等效成本变动范围非常广，由于并不够高，可断定明显不成比例，所以不被采纳。但如果被动消防的应用符合良好的设计原则，实施本案例的结论也是有可能的。

在对明显不成比例进行的讨论中曾建议查找等效成本曲线上的阶跃变化，本案例研究中没有进行这项工作。如果要进行这项工作，就必须对被动消防涉及的几种情况进行成本和收益分析，每避免一起死亡事故的等效成本计算方法同上。

可生成类似于图 15.4 的图，显示统计学上每避免一起死亡事故的等效成本（百万挪威克朗），等效成本是应用于结构的被动消防覆盖范围的函数，并以

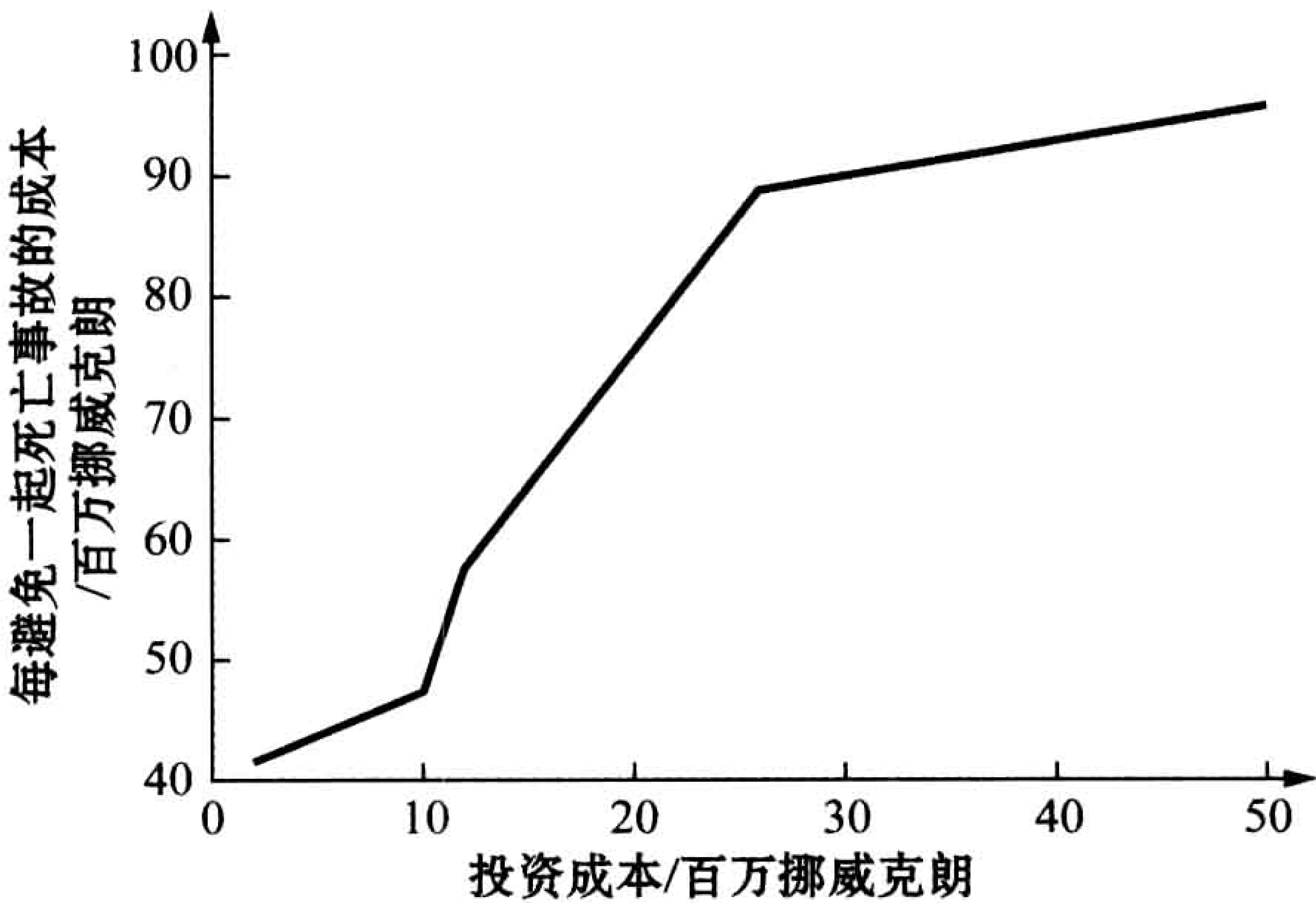


图 15.4　案例研究中每避免一起死亡事故的等效成本

投资成本进行度量（百万挪威克朗）。曲线上的阶跃变化发生于投资成本从 1 000万挪威克朗到大约 2 500 万挪威克朗之间，说明对应于每避免一起死亡事故需要 4 700 万挪威克朗的成本，因而低于 1 000 万挪威克朗的投资是明显不成比例的。

曲线阶跃变化的上部对应于投资成本为 2 600 万挪威克朗及每避免一起死亡事故的成本为 8 900 万挪威克朗，说明避免一起死亡事故的成本超过 8 900 万挪威克朗是明显不成比例的。

对于投资成本从 1 000 万挪威克朗到 2 600 万挪威克朗的区间，明显不成比例的边界要根据案例的细节进行确定和公开评价，并没有通用的规则。

15.5 风险指标 Risk Indicators

已经证明在作业阶段使用风险指标是进行量化风险评估的一个有效途径，因而建议对作业阶段的风险等级进行监控以确定其变化情况。风险分析应能识别对风险等级产生重大影响的参数或指标及其对风险等级的影响变化情况，这样就可以有效地监控风险等级。以下是这种指标的一些例子：

- 碳氢化合物泄漏频率；
- 高温作业的范围；
- 关键安全系统的可用性；
- 涉及事故原因中人和组织的关键风险影响因素(RIF)。

进行风险分析时开始必须将这些指标假设或指定为特定的数值，数值的改变意味着风险等级的改变，其目的是为了获取某些趋势的早期预警，这些趋势可能最终会导致无法满足风险接受准则的要求。所以必须能持续监控风险指标的趋势，这就要求指标应适合于在短时间内对变化情况进行识别。

风险指标监控的重点是关键风险指标，并且要提供工具，用于对风险分析所做假设的偏差进行识别和调整。

15.5.1 风险监控的“火灾爆炸预防与应急响应”法 “PFEER” Approach to Risk Monitoring

火灾爆炸预防与应急响应(HSE，1995a)规范要求对涉及被称为火灾爆炸

预防与应急响应评估的性能标准进行定义和监控。实施时通常会同时使用“高水平”和“低水平”性能标准。性能指标被描述为证明能够实现量化风险评估假设和前提所需的度量。指标还必须适合于在正常作业过程中进行监控。如果平台作业监控发现指标超标，进一步的要求就是对后果进行评价。

15.5.1.1　高等级性能标准 High Level Performance Standard

高水平性能标准通常就是风险接受准则。在相对比较短的时间内使用风险接受准则进行性能监控一般是不可能的。如果海上设施的死亡风险等级（潜在人命丧失值）为每年死亡 0.062 人，那么有时就认为这对应于发生死亡事故的间隔时间要超过 16 年。这种表述有两个问题：

- 关于风险的这种说明传递了非常明确的印象，即风险估计是对“真实”风险等级的统计学预测，而没有根据第 2 章提出的贝叶斯方法；
- 实际预测区间还要更长一些，因为有些事故的死亡人数多于一人（例如每起事故平均导致超过一人死亡）。

15.5.1.2　低等级性能标准 Low Level Performance Standard

低水平性能标准涉及风险评估和评价中最重要的假设和前提。性能指标通常定义作为观察值和性能标准的比较基础。性能标准的定义一般主要基于海上设施的相关量化风险评估，但英国管理机构还指出应该给予定性评价以适当的关注。

以下是埃尔夫石油公司 1997 年健康、环境与安全年报中用于弗丽嘉油田设施的性能指标（Elf Petroleum Norway，1998）：

- 气体泄漏频率；
- 高温作业活动的范围；
- 自动气体检测；
- 自动火灾检测；
- 管线紧急关闭阀的可用性；

- 消防供水；
- 喷淋系统阀门启动可用性；
- 住宿区应急照明可用性；
- 船员落水的救援时间；
- 烟雾救援小组的动员时间；
- 在集合区集合所有人员。

除了最后 4 个参数，大多数参数都是基于海上设施的量化风险评估。最后 4 个参数的第一个基于定性评价，其余 3 个是应急准备的重要内容。

15.5.1.3 其他实践 Other Practices

挪威规范体系中没有类似于英国火灾爆炸预防与应急响应评估的要求。但有一篇文章介绍了菲利普石油公司将指标应用于埃科菲斯克平台（Øien et al.，1997）。这篇文章提到了以下指标：

- 区域内有经验的生产操作员的数量；
- 平台上所有人员的数量；
- 电气设备的临界故障数；
- 每个时期的高温作业时间总计；
- 所有适用的高温作业限制被违反的次数；
- 每个时期的泄漏数；
- 有经验控制室操作员的数量；
- 生产组件关键安全失效的数量；
- 因老化而导致存在潜在安全后果的故障数量。

营运公司也出于各种目的在内部使用关键性能指数（KPI）。明显的例子有生产率、注入率、维修时间、维修积压、生产停工等。所以需要强调性能指数的使用不应局限于规范需求，而是应当作为所有油气公司日常作业的一部分，这是很重要的。

15.5.2 目标
Objectives

出于健康、环境与安全原因而使用性能指标的总体目标为：

- 使公司能够对健康、环境与安全活动进行管理；
- 对健康、环境与安全管理活动的效率进行度量；
- 确定健康、环境与安全领域需要实施进一步工作的优先区域；
- 尽早发现对安全至关重要的设备功能降低或不符合程序的情况；
- 满足规范体系涉及监控健康、环境与安全性能的要求。

即使营运多年也没有发生过事故或侥幸脱险的情况，重大危险的管理还是需要保持连续的高监控水平。如果海上设施长期营运而没有发生过严重事件，监控的动力和关注度常常会随着时间的推移而降低。

由于公司的需求可能倾向于一个（或几个）总体指标，在规范体系中使用总体指标的重要性可能就不相同，所以使用目标还是有区别的。总体目标可以分解为更精确的要求，所有类型的事故性能指标都应遵从以下要求：

- 指标应能表达各种类型的事故，从不重要的侥幸脱险到最严重和复杂的事故序列；
- 除了说明意外事件的实际后果外，还应说明其潜在的危险；
- 对于涉及潜在重大事故的指标而言，性能指标应能反映出相关意外事件的重要性。在关键安全区域进行未得到许可的高温作业要比 3 个并联消防泵（100%容量）中的一个失效更为严重；
- 需要能够反映单独系统的指标以及呈现完整情况的有限总体指标集。这样存在两个等级的指标是很正常的，最高等级的指标需要对涉及潜在重大事故的安全等级总体情况进行说明；
- 应该强调的是指标需要涵盖人、组织和技术方面，而不仅仅是通常涉及的技术方面。

以下主要讨论为了避免重大事故，营运公司需要使用一个或几个可以表达

最终安全等级的指标,因而主要在下文中介绍上述列表的最后 3 项。

开发用于重大危险事故的性能指标可分为两个阶段,其方法说明如下:

- 首先对应遵循的不同参数进行讨论,并提出选择的程序;
- 然后考虑如何将这些参数与总体性能指标结合起来。

15.5.3 选择个案指标的建议方法 Proposed Approach to Selection of Individual Indicators

15.5.3.1 火灾爆炸预防与应急响应的要求 PFEER Requirements

自 1995 年以来,管理机构就要求英国海上设施营运商制定性能指标。众所周知营运商制定的性能指标数量大相径庭,从几个关键参数到涵盖平台上所有的安全功能和行动。火灾爆炸预防与应急响应(HSE,1995a)对性能指标的要求如下:

- 性能标准应该与其所描述的系统目的、设备条目、程序等相关;
- 性能标准可按功能性、耐久性、可靠性和可用性进行说明;
- 指标应该可以度量和审查。

采纳这些要求意味着为满足火灾爆炸预防与应急响应规范,所需的性能指标数量是不多的,并且应限于:

- 证明对风险等级有重要影响的系统和功能;
- 在正常作业和应急训练过程中易于观察和测量的参数。

在此基础上有人认为对超过 20～30 个系统(每个系统有若干个特征)定义性能指标是误解了火灾爆炸预防与应急响应规范的目的,同时还认为无法区分重要和不重要违规行为对于理解规范目的也是无益的。对火灾爆炸预防与应

急响应要求的这种理解形成下文所述方法的基础。

但根据英国设计和建筑规范(HSE,1996)的说明选择“关键安全因素”时,为符合“关键安全因素”的定义,选择范围更广的系统是合适的。

15.5.3.2　选择参数 Selection of Parameters

在火灾爆炸预防与应急响应监控下,首先应根据海上设施量化风险评估所用事件树中的节点列表定义参数,这样就可以生成 15.5.1.3 节的参数列表。

但不是所有参数对总体风险等级的重要性都是相同的。一种将重点放在重要性最大参数上的方法是对事件树上的所有条件节点概率进行敏感性分析,以确定影响最大的参数。

许多公司都进行过这种敏感性研究,有时研究比较广泛,但通常只对非常有限的范围进行研究。在进行了全面研究的一个案例中(Vinnem et al.,1996b),对于参数的敏感性有一些明确的结论:

- 高温作业时间的减少能对人员风险和物资损失产生明显的影响,物资损失降低得最多;
- 降低爆炸的最大过压对人员风险的影响有限,但对物资损失风险的影响非常大;
- 提高紧急关闭系统的可用性对物资损失风险有一定的影响,但对人员风险没有什么影响。

其他条件概率(气体检测、作业人员干预、人工灭火、紧急关闭)的变化对风险几乎没有什么影响,特别是对于人员风险。这可以用来说明就必需提供的防护而言,这些系统的标准还是满足要求的。

敏感性研究的这些结果基于总风险的变化情况。随后的一篇论文(Vinnem,1997a)还对小型泄漏的后果进行了研究,研究表明为了限制涉及小型泄漏的风险,一些其他系统和功能也很重要。以下被证明是最为重要的:

- 气体泄漏检测(自动和人工);
- 作业人员进行干预,隔离泄漏;
- 人工灭火;

- 紧急关闭系统。

事件树的几个节点涉及紧急情况下的应急行动和事故处理。为确保能熟练实施一些行动需要进行培训,但有些行动的效果无法观察到,不适合于对正常作业或应急训练进行度量,因而只能使用可以观察到效果的应急行动。

定义一组性能标准首先应认识到对人员风险比较重要的参数和对资产比较重要的参数并不一定相同,但人员风险的重要性应该是最高的。如果考虑与小型(发生最频繁!)泄漏风险相对的总风险等级,那么还有一些比较重要的参数。对发生最频繁的泄漏进行控制应该给予高度关注,这非常重要,可以使作业人员对系统更有信心。而对一些主观上认为比较重要的方面进行考虑也很有必要,即便这些方面在“纯粹”的定量基础上也并不算重要。

第 15.5.1.3 节介绍了用于埃科菲斯克 2/4-T 平台的性能指标,以及以下指标选择的步骤(Øien et al.,1997):

- 基于可用的量化风险评估研究中的影响研究来选择技术指标;
- 基于理论研究并结合作业人员面谈审核来制定涉及组织的指标;
- 关注技术和组织措施在计息期内发生的变化,如果参数尚未进行审查,还要考虑开发度量系统所需的额外工作。

在埃科菲斯克案例中,列出的指标显示 9 个指标中有 5 个都与组织相关。

火灾爆炸预防与应急响应所产生的过程对组织因素关注比较少,因而有必要对关注重点的不同之处进行一些考虑。用于埃科菲斯克平台的指标中有3 个涉及不同群体的人员数量,这并不适合于进行性能监控,因为量化风险评估中的人员数量通常是取平均值。此外,其他组织因素只是作为潜在起火源而与高温作业相关。

对于选择涉及组织的性能指标,建议遵循以下原则:

- 首先,识别所有与组织相关,并且直接或间接包含在事件树中的指标;
- 其次,将重点放在可能涉及“非量化风险评估”场景的指标上,主要是人员防护所需的功能。

以下是选择性能监控指标的建议程序:

1）为所有可能定义为性能指标的参数制定一个“总列表”，应包括可直接或间接从事件树推导出的参数以及基于平台人员的更为定性和主观的参数。

2）对所有源自事件树的参数进行敏感性研究，并根据以下因素确定参数的相对敏感性：

- 总风险（OR）；
- 小型泄漏导致的风险（SLR）；
- 小型泄漏事态加剧（分别由火灾和爆炸引起）导致的风险（EFSLR 和 EESLR）。

3）忽略所有对任何风险后果都不产生影响的参数，或在正常作业过程中无法以有效监控的参数。

4）剩余列表中包含了需要继续研究并作为性能指标的参数，应确定监控的时间间隔及报告方法。

15.5.3.3　定义总体指标 Defining an Overall Indicator

埃科菲斯克平台研究（Øien et al.，1997）建议制定总体指标，但研究报告只限于分别对每个指标进行了后续研究。本节将介绍可用于定义总体性能指标的一种方法。上述选择性能监控指标的建议程序第 2 步中，需要对“相对敏感性”进行定义。假定海上设施的风险等级用“R”表示，敏感性研究的一个特定参数的值为“P”，如果 $p=\triangle P$ 且 $r=\triangle R$，那么：

- 如果输入到敏感性研究的参数值改变了 $p_s\%$；
- 并且如果相关风险参数改变了 $r\%$；
- 那么对于风险等级“R”，参数“P”的相对敏感性 S_R 可计算为：

$$S_R=\frac{r}{p} \tag{15.1}$$

建立总体性能指标的程序以上述 4 个步骤作为开始，并按以下步骤继续：

5）根据下述定义（NPD，1992a），将所有可能的参数划分为（aa）、（ab）、（ba）、（bb）或（bc）各类：

(a) 降低概率的措施,优先次序如下:

(aa) 危险情况发生概率的降低措施;

(ab) 危险情况发展为意外事件概率的降低措施。

(b) 减轻后果的措施,优先次序如下:

(ba) 涉及海上设施设计、承载结构及被动消防的措施;

(bb) 涉及安全和支持系统以及主动消防的措施;

(bc) 涉及应急设备和应急组织的措施。

6) 对于源自量化风险评估的参数,如果属于(aa)和(ab)类型,就选择计算所得到的最高相对敏感性值;如果属于(ba)和(bb)类型,对于小型泄漏导致的总风险就使用最高敏感性值;而(bc)类型的参数则忽略不做进一步的考虑。

7) 对于选择的组织因素,分配的相对敏感性值应等于技术参数的最高相对敏感性值。

8) 对所有选择参数的敏感性值进行规范化,使其总和为 1.0。

9) 现在就可以通过将不同的实际观测参数值由规范化相对敏感性值加权处理后得到总体指标值。

对于人员风险和资产风险分别进行步骤 1 到 9 的处理,得到的两个总体指标也应保持独立。对于步骤 5、6 和 7 需要做以下说明:

- (bc)类型由涉及组织的应急因素所组成,根据一般原则优先级是最低的。因此可以忽略以便将措施的实际可能数量降为最低;
- 为激励平台工作人员,应给予组织因素(通过步骤 1 建立)最高的敏感性值;
- 为反映不同类型在重要性上的差别,应对类型(aa)、(ab)以及类型(ba)、(bb)权重因数计算所采用的方法进行区别。

以下根据 Vinnem(1997a)所介绍的敏感性研究,通过案例研究对程序的使用进行说明。案例研究提出了下列参数:

- 碳氢化合物气体/液体泄漏;
- 泄漏检测失效;
- 操作员干预失效;

- 模块内部或外部起火；
- 爆炸过压、强烈爆炸；
- 火灾检测失效；
- 小火灾人工扑灭失效；
- 紧急关闭作业失效；
- 消防水不可用性；
- 事态加剧影响到附近设备；
- 结构倒塌所需时间；
- 紧急关闭阀的可用性；
- 喷淋阀的可用性。

喷淋阀的可用性不是事件树上的节点，所以这个参数没有明确的敏感性。而另一方面喷淋阀的不可用性是消防水不可用性的部分基础，因而敏感性可间接根据消防水参数的敏感性来确定。

最后，还应该参考挪威石油安全管理局的风险等级项目，这个项目制定了国家级的指标，如 Vinnem et al.(2006b)所述。项目还包含分别针对所有海上设施、生产设施和移动式平台的总体指标。图 15.5 显示了 1998～2005 年间所有海上设施的总体指标，数值为 3 年滚动平均值，这样计算是为了减少不同年份之间的差异。图 15.5 还根据 2000～2004 年间的平均值对预测区间（右侧长条上的灰色阴影区间）进行了显示，并将 2005 年的数值与这个区间进行比较以便确定是否发生了明显的变化。如果 2005 年的数值落在深灰色阴影区间，就说明有明显降低；如果 2005 年的数值落在上部浅灰色阴影区间，就说明有明显升高。完整的报告可从站点下载：http://www.ptil.no/rnns。

从图 15.5 可以看出在过去的 5～6 年里指标水平比较稳定。规范要求行业承诺会努力进行持续的改进，因而没有呈现出向下的趋势还是令人感到失望。

15.5.4 个案指标的权重 Weights for Individual Indicators

当使用个体指标来生成总体指标时，就产生了赋予个体指标什么权重的问题。图 15.5 显示的总体指标基于对 6 种类型的指标进行量化风险评估研究所

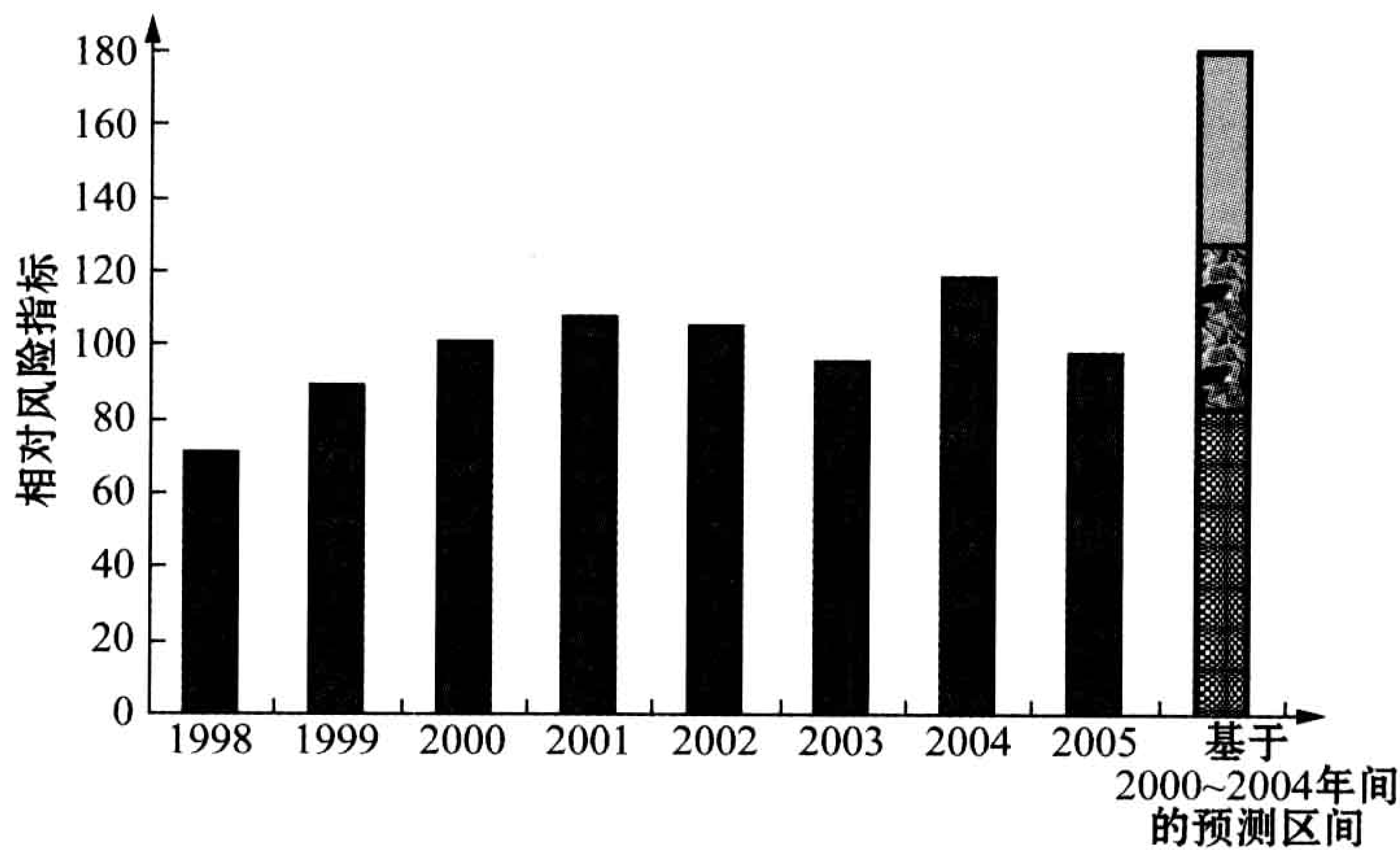


图 15.5 挪威大陆架所有海上设施的相对风险指标，以 3 年滚动平均值显示(图例说明见上文)

制定的权重。这些权重假定可以代表风险的统计学特征，这也意味着权重区间将会涵盖几个数量级。

在风险等级项目中这些权重是固定数值，独立于得到的屏障性能数据(见图 5.8)。

斯塔万格大学的一篇 2006 年硕士学位论文通过与专家的面谈，对不同挪威公司的不同加权系统进行了比较(Syvertsen，2006)。表 15.6 介绍了其中一个加权系统，权重基于公司风险评估专家的主观评价。应说明的是个体权重之间的差别都小于一个数量级，这同风险等级项目的个体权重差别达到几个数量级是大相径庭的。

表 15.6 一个公司用于总计个体指标值的权重

编号	说 明	权重
PS1	预防控制	9
PS2	自然通风和暖通空调	6
PS3	自动气体检测	7
PS4	紧急关闭	7
PS5	排水系统	3
PS6	起火源控制系统	8

（续表）

编号	说　明	权重
PS7	自动火灾检测	5
PS8	放空和火炬	7
PS9	消防水和消防系统	6
PS10	被动消防	6
PS11	应急动力，包括不间断电源和应急照明	3
PS12	生产安全性	6
PS13	报警和通讯	3
PS14	逃生和撤离	6
PS15	爆炸屏障	6
PS16	离岸起重机	3
PS17	钻探井喷和油井井喷预防	7
PS18	压载和保持位置	5
PS19	船舶碰撞	5
PS20	结构完整性	5

15.6　保养工作分析
Analysis of Maintenance Activities

单独来看，设备的小改造不代表能对风险等级产生任何明显的影响。这样当考虑涉及这些工作的风险时，量化风险评估就不是非常重要。控制小改造风险的主要工具通常是定性评价（本书不涵盖），包括：

- 改造工作本身的安全工作分析；
- 涉及生产系统和仪器系统改变的危险与可操作性研究；
- 其他涉及改造工作的定性评价。

另一项后来得到大量关注的工作是基于风险的检测，可见挪威石油标准化组织关于规律性管理和可靠性技术的 Z-016 标准(NORSOK，1999b)。

15.7 改装工作的整体分析 Overall Analysis of Modifications

15.7.1 概述 Overview

本节所论述的改装是中等规模的改装，范围从部分日常维护工作到涉及增加新设施和结构物的项目(见下一节“新设施的整合”)。改装项目通常包括研究阶段、工程、制造、安装、完成和运行。风险评估、风险接受和应急准备应涵盖所有涉及的阶段。

研究应包含所有涉及改装工作的相关海上设施，包括可能涉及作业的移动式平台和船舶以及附近的船舶和设备，如果这些船舶和海上设施距离比较近，可能会受到事故影响的话。

在研究阶段，应该对改造方案的可行性进行安全和风险接受评估。对于小改装要进行定性风险分析，而对于大改装和新结构，就可能需要定量风险评估。一般对涉及改装工作的设施现有量化风险评估进行部分更新就可以满足要求，而生产系统的改装则需要进行危险与可操作性研究。

对海上设施实施改装工作的整个时期应进行单独的风险[和应急预案]分析。这些分析需将改装工作导致的额外风险增加到海上设施的已有风险等级中，并同海上设施的风险接受准则进行比较。

对于小改装，因为显而易见是满足风险接受准则的，所以定性风险[和应急预案]分析应该就足够了。因而改装工作对风险等级的定量影响就可以作为海上设施量化风险分析和应急预案分析定期更新的一部分进行计算。

分析应确定需要进行安全工作分析的作业。以下方面可能会影响风险等级，如果相关的话就应该予以考虑：

- 改装工作期间设备上人员增加的数量；
- 危险区域人员增加的数量；
- 安装、改装和试生产期间涉及同时进行作业的风险；
- 使用高温作业，特别是涉及使用焊接或法兰连接；
- 将自然栖息地用于高温作业的影响；
- 安装作业时的坠落物体；
- 改装工作时安全系统的暂时不可用性；
- 改装工作对紧急关闭系统和生产安全性的影响；
- 因设备增加而导致泄漏源和爆炸载荷增加的数量；
- 直升机到附近平台或岸上的往返次数增加；
- 工作中的人为过失。

15.7.2 以生命周期的角度看待改装的风险 Modification Risk in a Life Cycle Perspective

改装工作通常是在海上设施处于正常作业情况下进行的，因而会造成设施上及设施周围作业水平的增加。工作周期可能相对比较短，也可能比较长。应该使用风险分析以确保改装工作本身不会导致不可接受的风险等级。

在评价改装工作过程中暂时增加的风险时应考虑以下参数：

- 最高风险等级。必须对是否能够接受最高风险等级进行评价，即使其持续时间可能并不长。这可能对是否按计划进行改装工作或是否需要在正常作业中实施弥补行动或限制产生影响。
- 作业期间导致风险等级升高。这种风险升高期间对人员面临总风险的影响需要根据风险接受准则进行考虑。
- 风险增加是局部的，比如影响海上设施的特定区域，还是全局的。局部风险增加更容易接受，而全局风险增加则不然。
- 考虑改装工作对正常作业的影响也是必要的，比如是否实现了特定风险的降低。如果最终结果能显著降低正常作业的风险，那么改装过程中风险的增加也就更加容易被接受。

所面临的总风险将基于改装过程中可能的风险增加以及改装结果可能导致的风险降低。图 15.6 显示了两种不同情况下的风险等级,包括没有实施风险降低措施的风险等级以及风险降低措施实施过程中和实施之后的风险等级。图中还显示了两种情况下风险的瞬时值和累积值。

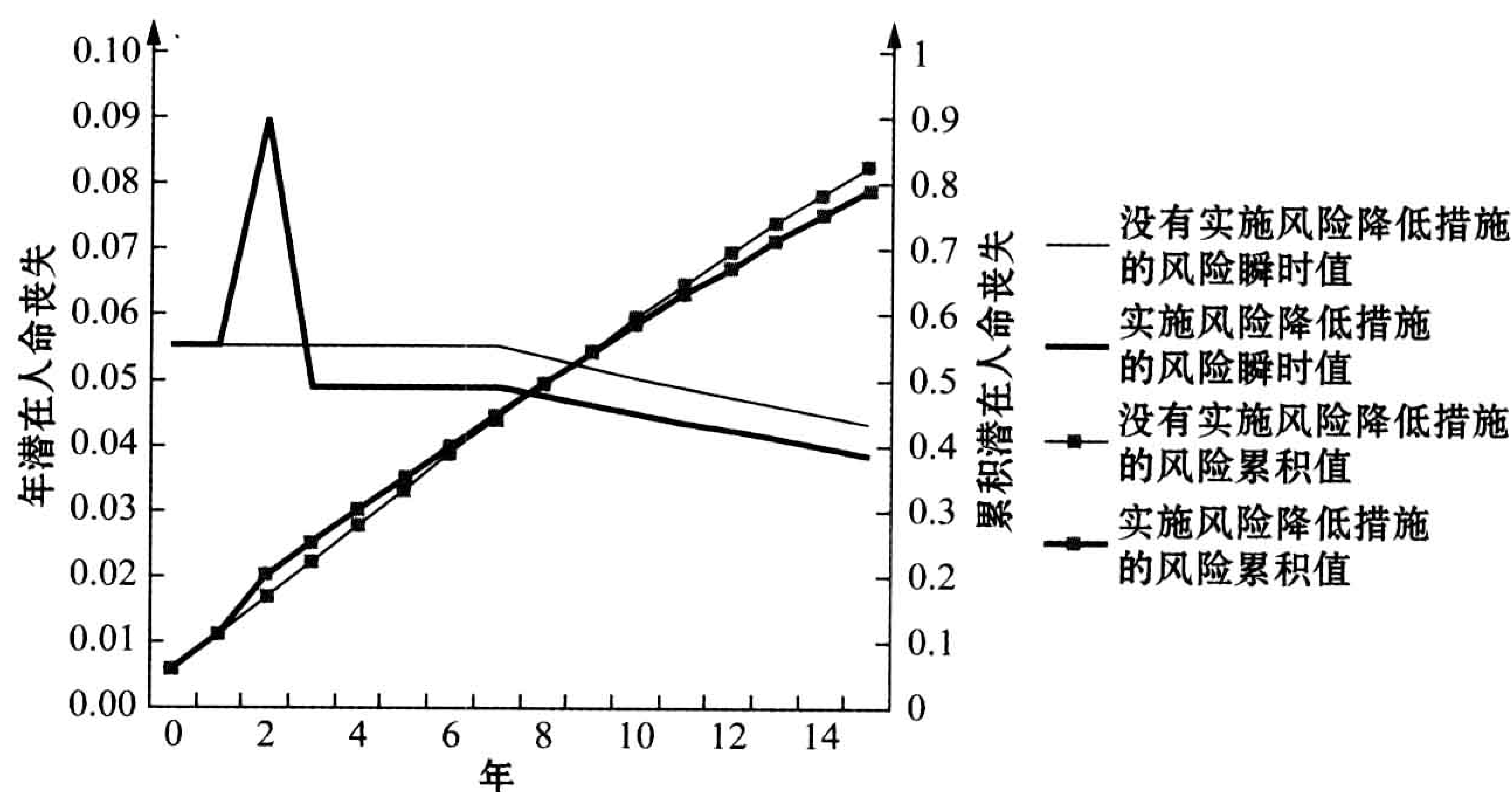


图 15.6 实施风险降低措施和没有实施风险降低措施的风险等级变化情况以及随时间推移对累积风险的影响实例

图 15.6 显示改装过程中风险等级明显升高,实施风险降低措施后风险等级比实施风险降低措施前略微降低。根据使用的数据[对于大改装而言是合理的],实施风险降低措施的累积风险等级需要经过比较长的时间才会比没有实施风险降低措施更低。

如果剩余使用寿命不到 10 年,就不值得实施风险降低措施。

关于接受改装工作的最终决策必须基于对所有参数的总体评价,对于改装工作尤其应考虑其生命周期。在风险增加和降低之间经常要进行权衡,如使用焊接管道连接还是法兰管道连接。因为降低了泄漏频率,作业时焊接连接的风险更低;但由于是高温作业,在改装过程中的风险更高。

建立能将风险分析能力整合到改装规划早期阶段的程序是健康、环境与安全管理的核心要素。这样就可以确保把风险分析有机地包含到改装工作的规划和执行中。

15.8　新设施的整合 Tie-in of New Facilities

以健康、环境与安全管理的观点，新设施常被视为新项目，如应按新项目的要求对工程、制造和安装进行风险评估。

关于新设施的整合，一个经常会讨论的问题是如何考虑新设施可能会导致海上设施上人员风险增加。这和通常所预期的相反，一般认为实施了作为技术屏障或作业屏障的新改进措施后，随着时间的推移风险应该是降低的。

新设施的整合常涉及新油田或新油藏的生产，不管是通过平台油井、水下油井，还是通过井口平台输送到海上加工设施。在这些情况下，新设施将包括以下一个或多个因素：

- 新井口；
- 新输入立管；
- 新生产组件或提高现有组件的性能；
- 新输出立管。

所有情况下都增加了新的泄漏源，如果其他方面没有变化，这将会提高泄漏频率，以及火灾或爆炸的频率。这也是导致所有人员风险增加的通常原因。

一般认为如果因损耗而导致风险等级升高，应采取弥补行动将风险等级降到先前水平或更低。但对于新设施则无法做到，因为问题在于同样的弥补措施是否适用于新设施，而答案并不是显而易见的。

不管是否应用了绝对风险接受范围或风险接受是否基于最低合理可行原则，这个挑战都是存在的。

附录　软件概述

Overview of Software

A.1 引言 Introduction

过去 10～15 年里开发了非常多的可用软件工具。本附录将简要介绍一些面向离岸/油气应用的主要软件工具，这些软件工具分为以下类型：

- 量化风险评估软件；
- 用于场景和概率分析的量化风险评估软件；
- 用于后果分析的量化风险评估软件；
- 风险管理软件；
- 定性风险评估软件；
- 事故和意外事件的报告和分析。

软件产品将先以综述方式进行简要介绍，然后是一些主要特点的说明。这些简介由软件供应商提供，只有收到了供应商反馈的产品才有详细说明。产品将介绍以下内容：

- 软件名及用途；
- 软件应用范围；
- 软件许可证情况、定价等。

应该强调的是，许多不同的供应商提供了大量通用计算流体力学软件工具，但在本附录后面的介绍中将不包括这些软件工具。有些软件工具对于评价火灾或爆炸载荷、气体扩散、或者溢油带移动等的应用还是非常有效的。因为这种类型的可用软件太多，无法对所有相关软件工具进行综述，因而本附录就没有包括这些软件。

概述中也不包括只针对非离岸应用的软件工具以及用于生产/运输规则性分析的软件工具。

从列出的供应商处可以购买到下面介绍的所有软件工具（见表 A.1、

表 A. 2、表 A. 3、表 A. 4、表 A. 5、表 A. 6)。

表 A. 1 用于定量风险分析的软件一览表

软 件	用 途	联系方式
ASAP®	对固定事件树集进行 3D 几何描述和分析	利里可咨询公司，挪威奥斯陆
COSAC®	用于油田开发项目早期阶段概念评价和筛选的风险评估软件工具	斯堪伯奥风险管理公司，挪威凯勒
CRA Tool®	对各种离岸开发概念进行快速风险排序的风险评估软件工具	阿特金斯公司，英国格拉斯哥
NEPTUNE®	离岸定量风险全面评估软件	挪威船级社软件公司，英国伦敦
PLATO®	3D 几何平台模型，对事态加剧的危险、火灾、爆炸和结构坍塌的发展及发生时间进行明确分析	环境资源管理公司，英国伦敦
RiskSpectrum®	故障树和事件树软件	瑞尔肯公司，瑞典斯德哥尔摩
RISK®	离岸定量风险全面评估软件工具	ERS 技术公司，英国
SAFETI®	用于燃烧、爆炸和有毒影响的定量风险全面评估软件工具	挪威船级社软件公司，英国伦敦

A. 2 电子联系方式 Electronic Contacts

下文列出了软件提供商的联系方式：

- ERS 技术公司，英国　www. erstechnology. com
- 利里可咨询公司，挪威　www. lilleaker. com
- 世纪动力公司，英国霍舍姆　www. autoreagas. com
- 挪威船级社软件公司，英国伦敦　www. dnv. com
- 舍夫泰克诺迪克公司，挪威特隆赫姆　www. safetec. no
- 阿特金斯公司，英国格拉斯哥　www. atkinsglobal. com/oilandgas
- EQE 公司，英国伦敦　www. eqe. co. uk
- 防火安全设计公司，瑞典　www. fsd. se
- 四元素公司，英国伦敦　www. erm. com

- 预测技术公司　www. prediction-technologies. com
- 斯堪伯奥风险管理公司，挪威凯勒　www. scandpower. no
- 阿特金斯公司，英国布里斯托　www. atkinsglobal. com
- 杰克斯康公司，挪威卑尔根　www. gexcon. com
- 肯普特 IT 公司，挪威特隆赫姆　www. computit. no
- 瑞尔肯公司，瑞典斯德哥尔摩　www. relcon. se
- 斯堪伯奥石油技术公司，挪威　www. scandpowerpt. com

表 A. 2　用于场景和概率分析的量化风险评估软件一览表

软　件	用　途	联系方式
BlowFAM®	对特定油井作业的井喷风险进行评价	斯堪伯奥公司，挪威凯勒
COAST®	海运交通数据库，对于用户界面及航运线路和船舶特征的图示使用了地理信息系统	舍夫泰克诺迪克公司，挪威特隆赫姆
COLLIDE®	分析船舶和平台之间的碰撞风险	舍夫泰克诺迪克公司，挪威特隆赫姆
DATABASE Manager®	可靠性分析数据的存储、处理和显示	ERS 技术公司，英国
Egress®	针对撤离/救援建模进行集合和撤离仿真	ERS 技术公司，英国
LEAK®	计算海上设施的泄漏频率	挪威船级社软件公司，英国伦敦
RDAT-Plus®	贝叶斯数据分析	预测技术公司，美国马里兰州
CARA-Fault FaultTree®	故障树分析和构建	舍夫泰克诺迪克公司，挪威特隆赫姆

表 A. 3　用于后果分析的量化风险评估软件一览表

软　件	用　途	联系方式
AutoReaGa®	基于计算流体力学的爆炸仿真	世纪动力公司，英国霍舍姆
Firex®	对主要的火灾特征和响应进行经验预测	斯堪伯奥风险管理公司，挪威凯勒
FLACS®	爆炸仿真	杰克斯康公司，挪威卑尔根
KAMELEON FireEx-KFX®	火灾和气体扩散仿真	肯普特 IT 公司，挪威特隆赫姆
Mona®	用于单组分多相系统仿真的先进工具	斯堪伯奥风险管理公司，挪威凯勒
Olga®	用于由流送管、立管和生产设备组成的系统的瞬态多相流体仿真器	斯堪伯奥风险管理公司，挪威凯勒

（续表）

软　件	用　途	联系方式
PHAST®	用于确定危险物质意外排放后果的基于 Windows 的软件工具包	挪威船级社软件公司，英国伦敦

表 A.4　用于定性风险评估的软件一览表

软　件	用　途	联系方式
PHA-Pro®	危险记录和报告工具，包括 4 种生产危险分析技术：危险与可操作性研究、假定/一览表、失效模式与影响分析以及预先危险分析。	挪威船级社软件公司，英国伦敦
PHAROS®	整合工作危险分析过程及工作许可制度的软件工具	EQE 公司，英国伦敦
Kyrass®	通过危险记录进行安全管理	舍夫泰克诺迪克公司，挪威特隆赫姆
Sabaton®	失效模式与影响分析及故障模式影响与危害度分析	舍夫泰克诺迪克公司，挪威特隆赫姆

表 A.5　用于事故和意外事件分析的软件一览表

软　件	用　途	联系方式
ProSafe®	记录意外事故信息，包括对趋势及准备定义的模式的概率进行分析和报告	EQE 公司，英国伦敦
Synergi®	对意外事件和事故信息进行记录分析和报告	普莱德公司，挪威斯塔万格

A.3　定量风险分析软件 Quantitative Risk Analysis Software

A.3.1　ASAP®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　对固定事件树集进行 3D 几何描述和分析；

- 供应商　　利里软件公司，挪威巴洛姆；
- 定价　　在利里软件公司终端服务器上使用 ASAP 的许可证费用：
  16 万挪威克朗(12 个月)，
  9 万挪威克朗(6 个月)，
  5 万挪威克朗(3 个月)，
  2 万挪威克朗(1 个月)，
  价格 2006 年有效。

ASAP®是计算与碳氢化合物相关的海上设施油气泄漏、火灾和爆炸风险的计算机分析软件包，通过将模型调整为三维几何图形，可以在水平和垂直方向上进行复杂的交互。在 3D 图形上能对诸如气体和液体喷涌以及随后的气体扩散和火灾蔓延等场景进行观察，以便更好地解读事故。

表 A.6　用于风险管理的软件一览表

软　件	用　途	联系方式
Hazard Log Database Management®	危险的记录和管理	阿特金斯公司，英国布里斯托
PRISM®	安全管理审核软件工具，安全管理性能评估	ERS 技术公司，英国
Riskplot II®	风险总计及呈现软件工具，包括风险概述、频数(f-N)数据、风险样例和支配事件列表的输出	四元素公司，英国伦敦
ORBIT Offshore®	针对离岸上部系统，设计用于支持涉及基于风险检测(RBI)分析工作的计算机系统	挪威船级社软件公司，英国伦敦
BowTieXP®	通过“蝶形结图”的图形界面管理人员、环境、资产和名誉的主要风险	加沃纳 BV 公司，荷兰
THESIS	通过“蝶形结图”的图形界面管理人员、环境、资产和名誉的主要风险	ABS 咨询公司，英国沃灵顿

ASAP®由设计包、物理和统计模型以及设计界面模型组成，设计界面模型在物理模型和设计之间建立了联系。用户在设计包中对海上设施的几何形状以及内有碳氢化合物的设备的生产流程图进行设计。所有模型都是智能的，可以自动根据几何形状和用户定义的逻辑进行调整。这意味着程序能以快速一致的方式进行设计改变及概念发展。

根据 NORSOK Z-013 和挪威国家石油公司/挪威水电公司针对承压系统火灾防护的内部指导准则，为了对气体扩散、检测、起火和设备调整进行瞬态分析，目前开发商正在对 ASAP®进行重新设计。

A.3.2 COSAC®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　用于油田开发项目早期阶段概念评价和筛选的风险评估软件工具；
- 供应商　斯堪伯奥风险管理公司，挪威凯勒；
- 定价　　每许可证 12 万挪威克朗。

COSAC®是用于在油田开发项目早期阶段进行有效风险评估的计算机软件工具。

COSAC®的分析和结果特别针对于概念的评价和筛选。其目的是通过利用从风险分析中获取的 20 年经验来改善离岸新开发项目的安全性。COSAC®的一些主要特点包括减少早期阶段安全评价的不确定性并提高质量和效率。COSAC®为涉及离岸油田开发概念的每个风险要素都提供了安全性评分。得分低说明需要关注其安全性和/或缺少对重要安全问题的记录，所以 COSAC®中的低安全性评分可以引起对这些问题的重视。此外 COSAC®还能为用户提供如何解决所发现问题的信息。

A.3.3 CRA Tool®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　可用于评估各种离岸油气概念的快速风险跟踪软件工具；
- 供应商　阿特金斯公司，英国格拉斯哥；
- 定价　　请接洽供应商。

CRA Tool®（概念风险评估软件工具）关注的重点是在新离岸油气开发中

能推动风险等级的关键参数。模型是与英国石油公司和壳牌公司合作开发的，根据大量概念对资产、人员和环境的风险而对其进行快速排序的需求是推动开发的因素。

这个软件工具已经应用于北海和世界范围内的大约30个新油气及浓缩产品的开发，帮助选择最佳的概念。创新性在于其风险评估是基于针对危险设备每个组成部分的许多预处理风险构件，并且对于设计的特定方面可以通过调节系数进行调整。

A.3.4 NEPTUNE®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　离岸风险分析；
- 供应商　挪威船级社软件公司，英国伦敦；
- 定价　　请接洽供应商。

NEPTUNE®是OHRAT的后继产品，于1999年发布。NEPTUNE®是一款用于定量风险评估设计、计算及提供全面跟踪能力的软件工具。系统架构的设计可以为系统配置（客户端/服务器、分布式解决方案、数据通讯以及网络解决方案）提供最大的灵活性。NEPTUNE®包含了用于计算泄漏、扩散、池形成和蒸发、燃烧和毒性作用与影响的模型，以及设计用于海上设施特定需求的模型，比如烟雾生成、集合区危险、与船舶的碰撞等。此外，还特别重视可以使用户生成新的模型。通过多种分析能力，包括后果建模、事件树建模、泄漏频率计算、敏感性和假定分析，NEPTUNE®为危险和风险提供了灵活的建模。NEPTUNE®基于非常简单的概念，数据沿着指定路径从一个模型流动到另一个模型。数据只输入一次，如果在研究的任何地方进行了改变，数据都将沿着指定路径流动并对其后的研究产生影响。NEPTUNE®在MS-Windows®下运行，并完全集成了像Excel®（包括Visual Basic®）这样的软件工具。

A.3.5 PLATO

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　3D几何平台模型，包括对涉及安全的工程组件和设计特点进行表达，对事态加剧的危险、火灾、爆炸和结构坍塌的发展及发生时间进行明确分析；
- 供应商　环境资源管理(ERM)公司，英国伦敦；
- 定价　3.6万英镑(也可采用租借方式)；可选年维护费：每年3 000英镑(电话支持及软件小修正免费)。

PLATO使用3D平台模型，可以对所有涉及安全的工程组件和设计特点进行明确表达。对事态加剧的危险，如火灾、爆炸和结构坍塌的发展及发生时间进行仿真，自动生成安全相关组件的影响后果场景。处理的结果不仅可用于社会和个体总风险，还能用于确定事态加剧的主要机制及关键的安全设备。事件树方法的主要优点是实现建模、可审查性、对几何形状和时间的明确表达以及易于进行设计选择或平台修改的评价更新。

A.3.6　RiskSpectrum®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　故障树和事件树软件；
- 供应商　瑞尔肯AB公司，瑞典斯德哥尔摩；
- 定价　请接洽供应商。

RiskSpectrum®概率安全评估软件专业版提供直观的用户界面，建模范围从带有"和或门"的基本故障树到在链接事件树中整合了边界条件和共同原因失效(CCF)事件的高级故障树和事件树。

集成分析软件工具(RSAT)是为解决大型概率安全评估(PSA)模型而专门设计的，提供最小割集(MCS)、敏感性、重要性及时变分析。RiskSpectrum®概率安全评估软件专业版还包括了最小割集编辑器和先进的后处理功能。这款软件有以下分析功能：

- 基于快速割集算法的强大分析功能，能生成并存储最小割集(MCS)。
- 对已有的任何最小割集表，RiskSpectrum®可以对不确定性、重要性、敏

感性以及时变可靠性措施进行计算。

- 分析可以从几个层面进行：任意故障树门、任意单独事件树序列、任意后果（每个事件树序列都可以分配一个或多个后果，如工厂破坏状态）。
- 可以为分析案例指定“边界条件集”，包含了应用于模型的一系列逻辑设置，包括对房形事件、基本事件和门的是/否状态设置。这对基础相同或发生变化的模型及敏感性进行分析都是非常有帮助的。
- 分析分组可用于为多达数千、以自动序列进行的分析定义复杂的集合。当对整个概率安全评估进行重新计算时这就非常有价值。
- 对事件树的成功顶事件进行定性和定量处理。

RiskSpectrum®专业版是为了满足对核电设施完整概率安全评估（PSA）软件工具的需要而特别设计的。

- 在事件树和故障树之间以及一系列事件树之间建立链接。
- 用于基础模型复杂变化的房形事件和交换事件使得管理不同工厂布置及针对不同触发事件和/或不同事故序列的专门化模型更为容易。这些特点对于进行外部事件分析尤为重要。
- 基于几种不同共同原因失效（CCF）模型，用于共同原因失效自动量化的共同原因失效组。

事件树和故障树编辑器完全图形化，内嵌诸如剪切、复制、粘贴和拖放等 Windows 功能，使得 RiskSpectrum®专业版易学易用。

RiskSpectrum®专业版使用了“开放的”Microsoft Access 数据库格式。每张数据库表就记录数而言几乎是“无限”的，其明显的限制就是存储媒介（硬盘）上的可用空间。

A.3.7 RISK®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　离岸定量风险全面评估软件工具；
- 供应商　ERS 技术公司，英国；

- 定价　　　无可用信息。

RISK®是在 EXCEL®上开发的链接电子表格的量化风险评估模型。用户可以明确识别风险评估过程的关键阶段,并对单独重大危险事件进行跟踪,从触发到事故发展,再到其对事故场景、临时避难所损害、个体风险以及潜在人命丧失的影响。RISK®的主要特点是:

- 采用符合行业标准的电子表格软件包(EXCEL®)进行开发;
- 用户界面友好,工程师不必正式培训就能使用;
- 易于适应并满足特定项目的要求;
- 软件结构清晰,并能以合适的细度水平关注关键场景。

A.3.8 SAFETI®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　　用于燃烧、爆炸和有毒影响的量化风险全面评估软件工具;
- 供应商　　挪威船级社软件公司,英国伦敦;
- 定价　　　请接洽供应商。

SAFETI®(用于评估燃烧、爆炸和有毒影响的软件)是可用的最为全面、使用最广泛的非离岸量化风险评估软件包。软件基于 Windows®系统,并为重大化学风险的量化提供了容易使用并符合行业标准的方法。可对重大危险的可能性和严重性进行分析,并能使用 PHAST®模型对重大泄漏的后果进行预测。通过将这些信息与危险频率相结合,并考虑人口分布位置和密度以及对燃烧和爆炸产生影响的起火源位置,就有可能对“风险”进行多重呈现,包括风险概述、频数(f-N)曲线、风险样例以及特定位置的风险排序。

A.4 场景与概率分析的量化风险评估软件工具 QRA Tools for Scenario and Probability Analysis

A.4.1 BlowFAM®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　通过评估影响井喷概率的大约 300 个要素，对特定油井作业的井喷风险进行评价；
- 供应商　　斯堪伯奥风险管理公司，挪威凯勒；
- 定价　　许可证情况："挪威科技工业研究院离岸井喷数据库"成员为 12 万挪威克朗；BlowFAM 指导委员会成员为 25 万挪威克朗(包括 3 个用户许可证)；特许情况下在项目中使用 BlowFAM® 为 4 万挪威克朗。

BlowFAM®是一款用于评价特定油井作业井喷风险的个人计算机软件工具，是在参与公司钻探/油井作业人员的密切合作下开发的。此外，来自几家承包公司的钻井专家也提供了帮助。

BlowFAM®模型确定了影响井喷概率的大约 300 个要素，其中许多要素适用于整个油井生命周期，而有些要素只涉及特定的油井阶段，如钻井。根据这些要素对风险的重要性，软件还对其进行了评级。软件还可以识别出特定开发的重要风险要素并实施符合成本效益的风险降低措施。

BlowFAM®模型还是将风险要素传递给油井作业钻探人员的有价值的软件工具。

A.4.2 COAST®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　收录挪威和英国大陆架及世界其他地区固定航运详细信息的海运交通数据库，包括使用地理信息系统图形化显示航运线路和船舶特征信息；
- 供应商　舍夫泰克诺迪克公司，挪威特隆赫姆；
- 定价　　无可用信息。

COAST®是运行于地理信息系统上的海运交通数据库，收录了挪威和英国大陆架及世界其他地区固定航运的详细信息。COAST®中的数据以航运线路的形式进行呈现，每条航线包含的信息有：航线上每年的船舶数量、船舶类型和尺寸分布、航线宽度(标准、偏航)等。COAST®有助于在用户指定的位置进行检索，识别检索区域的航线图、交通密度及船舶特征，以及同检索位置的距离和方位。地理信息系统程序可自动在电子海图上绘出识别的航线。

1995/1996 年期间，舍夫泰克公司在英国离岸营运者协会、健康与安全管理局以及环境、交通与区域部资助的项目中开发了 COAST®，并成功达到了其主要目的：提供全面、及时、易用的海运动态数据库，可用于对英国水域的海运和海上设施风险进行评估。2002 年在挪威石油工业协会的资助下开发了 COAST Norway®，除了北海，还能提供涵盖挪威水域的更为全面、详细的信息。

COAST®的主要数据源是劳氏船级社港口日志数据、自动识别系统的数据、雷达数据以及大量的交通调研。每年还另外进行调研和数据收集工作以保持系统的准确性。COAST®的新平台正在开发中，以满足对更全面新数据源的使用需求。

A.4.3 COLLIDE®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　分析船舶和平台之间的碰撞风险；

- 供应商　　舍夫泰克诺迪克公司，挪威特隆赫姆；
- 定价　　无可用信息。

COLLIDE®是由舍夫泰克公司在英国、挪威、丹麦、德国和荷兰的离岸营运商赞助下开发的一款碰撞风险分析软件工具，用于帮助对船舶碰撞风险进行评估。软件工具的主要功能是计算船舶与任何离岸结构碰撞的频率及后果。

系统提供了用于评估涉及过往船舶（商船、油船、渔船、守备船、供应船）航行及抵达船舶（海上设施伴随船、守备船、供应船）航行的模型，并对漂移和碰撞场景进行了考虑。COLLIDE®的主要数据源是详细的海运交通数据，数据可能来自 COAST®或其他可用数据源。输入数据还包括海上设施详细信息、环境数据（风、浪等）、船舶特征等。

考虑到技术发展的影响及其他可用信息源，COLLIDE®模型会定期进行更新。

A.4.4 Database Manager®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　用于可靠性分析数据的存储、处理和显示；
- 供应商　　ERS 技术公司，英国；
- 定价　　无可用信息。

Database Manager®是专门用于处理可靠性和安全数据的数据库软件。数据可以输入或从 ERS 技术公司自己的数据库中获取。随后 Database Manager®可以对数据进行配置、检索和分析，并以各种报告格式进行呈现。

Database Manager®有助于同其他数据库之间进行数据交换。除了硬件可用性外，数据输入几乎不受任何限制。可以处理多种数据库类型，包括所有主要的可靠性数据库。

A.4.5 Egress®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　　针对撤离/救援建模进行集合和撤离仿真；
- 供应商　　ERS 技术公司，英国；
- 定价　　　无可用信息。

EGRESS®程序可以对大量人员的移动进行仿真，如人员在海上设施上进行集合时。软件以互联单元矩阵的方式对平台布局进行建模。程序涵盖了人员的物理移动和行为决策，并以图形方式输出结果，这样移动就可用实时图形进行呈现。软件的开发是作为英国行业合作项目的一部分，参与项目的有 ERS 技术公司、壳牌公司、德士古公司、埃克森公司以及健康与安全管理局。

程序已经应用于离岸和岸上油气业和其他行业，为事故中人员的移动提供评估。

A.4.6　LEAK®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　　计算海上设施的泄漏频率；
- 供应商　　DNV 软件公司，英国伦敦；
- 定价　　　请接洽供应商。

LEAK®是一款计算海上设施泄漏频率的软件工具，一般用于石油平台。每个海上设施都分解为若干区域，每个区域分解为若干部分，每个部分包含了若干设备组。每个设备组由基本部件构成，比如阀门、法兰、管道等。LEAK®基于内建的历史泄漏频率数据计算设备、区域、部分或设备组的泄漏频率，并报告每种用户定义类型的总频率及每个影响要素。使用的模型将大于一定规模的泄漏频率表达为等效孔径的连续函数。计算中使用的历史数据从数据库中读取，因而可以包含最新的数据。

A.4.7　R-DAT Plus®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　贝叶斯数据分析；
- 供应商　　预测技术公司，美国马里兰州海厄兹维尔；
- 定价　　无可用信息。

R-DAT Plus®是风险分析师使用的功能全面的贝叶斯数据分析软件包，为需要进行系统特定分析并基于行业数据开发一般优先分布的用户所设计。

R-DAT Plus®为用户存储和组织多种可靠性数据及相关信息提供了强大、简单而灵活的环境。层次结构使用户能够以任意细度水平分析功能、结构或任意其他类型的故障。这个层次结构中的元素如同文件夹，包含了可靠性数据及对数据集进行贝叶斯分析的结果。

用户根据可用信息的类型和等级，通过 R-DAT®能以多种不同的方式对优先分布进行指定，包括各种参数分布（如对数正态分布、贝塔分布和对数均等分布），并可使用多种输入选择的任意一种，如上下界、平均和方差、或者分布参数。此外，R-DAT®还能使用户基于行业数据（其他工厂的失效数）和专家估计来计算一般分布。对于给定的组件类或触发事件，分布结果可以代表工厂与工厂失效率的变化情况，并且为实施两阶段贝叶斯方法，分布结果还可用于工厂的特定分析中。

A.4.8 CARA-FaultTree®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　故障树分析和构建；
- 供应商　　塞维斯特软件公司（www. sydvest. com）；
- 定价　　单用户许可证费用为 1.2 万挪威克朗（约 1450 美元/1750 欧元）。

CARA-FaultFaultTree®是用于故障树分析和构建的软件工具。故障树是一种逻辑图，可以显示系统中潜在关键事件（事故）和事件原因之间的相互关系。通过构建故障树，可以分析系统为什么失效以及深入了解组件如何对系统可靠性产生影响。软件直观的图形用户界面可以让用户迅速构建出故障树。共计可以使用 6 个系统性能指标和 6 个组件重要性指标，同时软件还有增强的

报告功能。

A.5 后果分析的量化风险评估软件工具 QRA Tools for Consequence Analysis

A.5.1 AutoReaGas®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　用于分析可燃气体混合物燃烧及后续爆炸影响的集成计算流体力学软件工具；
- 供应商　世纪动力公司，英国霍舍姆；
- 定价　　无可用信息。

AutoReaGas®是一款用于可燃气体混合物燃烧及后续爆炸影响的集成计算流体力学软件工具，具有强大的交互性。软件的行业应用包括离岸平台、岸上石化工厂和生产厂、发电厂、采矿设备以及运输系统的风险和安全评估。

AutoReaGas®可以对气体云爆炸进行数值仿真，包括流场里的火焰蔓延、紊流及对物体的影响。程序还能对产生的冲击波及其同结构的相互作用进行仿真。

软件由世纪动力公司和 TNO 公司共同开发，并成功集成了 REAGAS®、BLAST®和 AUTODYN®程序的许多出色特点，为这款商业程序提供了独特的能力。程序已经并将继续对经验数据进行广泛的验证。

可以通过一次性支付许可证费或支付年许可证费使用 AutoReaGas®，提供试用和培训。

A.5.2 Firex®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　基于经验相关性对主要火灾特征和火灾场景响应进行预测；
- 供应商　斯堪伯奥风险管理公司，挪威凯勒；
- 定价　　个人计算机版软件 4.5 万挪威克朗。

Firex®程序可以对主要火灾特征和 6 种火灾场景响应进行预测：

- 露天池火；
- 密闭池火；
- 海面火灾；
- 喷射火；
- 扩散性闪火；
- 火球/沸腾液体膨胀蒸气爆炸。

Firex®基于众所周知的预测方法，已经用于实验数据的比较和验证。Firex®可以预测：

- 没有被火焰吞没的目标物体上的事故热辐射，作为与火焰距离的函数；
- 被火焰吞没的目标物体上的热通量，作为距离火灾发生时间的函数；
- 钢结构的温度响应，作为时间及绝热程度和类型的函数；
- 烟雾的产生及烟雾中的能见度，作为距离起火发生时间的函数；
- 池火危险的范围；
- 火球危险的范围；
- 密闭池火的上限温度及高温气体的排放。

A.5.3　FLACS®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　用于对工业环境和大气中气体流和空气流进行分析的三维计算流体力学软件工具。主要应用领域包括通风、扩散和气

体爆炸以及随后的冲击波效应。

- 供应商　　杰克斯康公司，挪威卑尔根。
- 定价　　各种选择的价格组合请洽供应商 flacs@gexcon. com。

自从 1980 年以来，在 10 家国际油气公司以及 3 个国家立法机构的合作、支持、指导和资助下，FLACS® 的开发就没有间断过。FLACS® 的特定应用验证、广泛的适用性和效率使其成为开发工作优先选择的软件工具。

软件已经为世界上超过 300 个海上设施和非离岸行业领域（通过杰克斯康公司）进行了爆炸后果评估和风险分析，同时还被世界上众多咨询人员所使用（2006 年 FLACS®在全球有 40～50 个用户组）。此外软件也越来越多地应用于通用工业计算流体力学分析，特别是涉及复杂几何形状内及周围流体的情况。近年来还证实软件可用于大气扩散研究。

FLACS®的详细特点及应用包括：

- 爆炸仿真：
  - 任意起火点位置；
  - 碳氢化合物气体（例如甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、乙烯、丙烯和乙炔的任意混合气体）和氢；
  - 可变气体云规模；
  - 可变气体浓度；
  - 防爆口挡板：重量、开口模式、开口压力；
  - 缓冲墙：失效模式；
  - 喷水影响：喷嘴类型、流速、位置；
  - 任意类型的百叶窗式墙、板片角度、有效开口；
  - 爆炸区域外的冲击波强度预测；
  - 惰性气体的影响，CO_2、N_2以及各种 O_2浓度；
- 扩散仿真：
  - 气体排放建模；
  - 泄漏源位置、大小和方向；
  - 强制和自然通风情况；
  - 气体检测器所处位置的气体浓度分布；
  - 喷射排放/扩散排放；

  - ○ 真实场景设计：扩散过程中任意时间或地点的起火；
  - ○ 废气排放和扩散；
- 通风仿真：
  - ○ 外部风场建模；
  - ○ 强制/暖通空调通风；
  - ○ 百叶窗曳力系数；
  - ○ 不同外部风力条件下的换气率；
  - ○ 网及其他障碍物的影响；
  - ○ 模块内及通过百叶窗的流速；
  - ○ 风冷指数的计算；
  - ○ 直升机坪安全评估。

A.5.4　KAMELEON FireEx-KFX®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　基于计算流体力学的软件工具，用于预测复杂几何形状内的气体扩散、火灾特点和响应以及缓解火灾和灭火的分析和设计；
- 供应商　肯普特 IT 公司，挪威特隆赫姆；
- 定价　　短期或长期使用合同，包括学术许可证和商业许可证。

Kameleon FireEx-KFX®是一款专门用于气体扩散和火灾仿真的先进仿真软件，主要特点如下：

- 三维瞬态有限量计算流体力学软件；
- 包含 CAD 导入功能(PDS、PDMS、Flacs macro 及其他)；
- 具备有限元结构响应程序 Fahts/Usfos 的接口；
- 包含通过给水系统(洒水装置、喷淋、防护屏、喷雾等)缓解火灾的详细拉格朗日模型；
- 包含有效易用的前处理及后处理能力；

● 软件由肯普特 IT 公司、挪威科技大学和挪威科技工业研究院开发，合作者包括挪威国家石油公司、托特公司、ENI 集团、黑德罗公司、康菲石油公司、法国燃气公司、罗加斯和桑迪亚国家实验室(美国)；
● 大量应用于全球工业分析已超过 20 年。

KFX 可进行的工业分析一般包括：

● 所有类型的火灾仿真，包括池火、喷射火、雾火、闪燃、密闭火灾、复杂拥挤区域的火灾或露天火灾，这包括对温度、辐射、烟雾、能见度、物质浓度、有毒气体、噪声等的详细计算；
● 火灾对结构和生产设备的影响；
● 被动消防的优化；
● 火灾温度、辐射和烟雾对人员的影响；
● 对逃生通道的评价；
● 通过给水系统(洒水装置、喷淋、喷雾、防护屏)缓解火灾的仿真和评价；
● 闪燃仿真，辐射、噪声(非标准版 KFX)、喷嘴详细仿真；
● 气体扩散；
● 爆炸云规模计算；
● 气体和火灾探测系统；
● 锅炉和发动机燃烧、锅炉设计等；
● 减少 CO、NO_x等的排放；
● 暖通空调(通风仿真)；
● 涉及直升机作业、建筑、环境等的湍流分析；
● 一般液体流动和燃烧；
● 3D 可视化、动画、真正 CAD 几何形状绘制的轮廓图。

A.5.5 Mona®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

● 功能　　用于单组分多相系统仿真的先进通用软件工具；

- 供应商　　斯堪伯奥风险管理公司，挪威凯勒；
- 定价　　　待定。

Mona®是用于单组分多相系统仿真的先进通用软件工具，能处理一般管线网络和船舶及热不平衡情况。Mona®对水击和气穴的仿真能力已经在瑞典和德国的环形试验管道得到证实。

A.5.6　Olga®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　　用于由流送管、立管和生产程设备组成系统的瞬态多相流体仿真器。
- 供应商　　斯堪伯奥石油技术公司，挪威凯勒。
- 定价　　　可获得有限时间许可证或永久许可证。

Olga®是一款用于瞬态多相流体现象的仿真器，能对流送管、立管和生产设备的一般网络进行建模。

Olga®在预测压力梯度、持液率、流态和流速上要比竞争模型和相关性方法更为精确。Olga®预测冷凝管线排放特征的能力对于海上设施的风险分析尤为重要。

挪威科技工业研究院在特隆赫姆的两相流体环形试验管道进行的超过1万次实验检验并证实了Olga®的功能。

A.5.7　PHAST®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　　用于确定危险物质意外排放后果的基于Windows的软件工具包；
- 供应商　　挪威船级社软件公司，英国伦敦；
- 定价　　　请接洽供应商。

PHAST®(生产危险分析软件工具)是基于 Windows 的软件工具包,用于确定危险物质意外排放的后果。软件可以对潜在意外事件的发展进行检查,从最初泄漏,到形成云(汇集或不汇集成池),直至扩散。软件使用了挪威船级社特有的统一扩散模型(UDM),当条件发生变化时可以应用合适的夹带及扩散模型,并整合相关的个体模型,这样就能平滑、连续、自动地进行行为模式的转变。软件适用于许多加工业和化工业的所有设计和营运阶段,用于识别对生命、财产或环境有潜在危险的各种情况。

A.6 定性风险评估软件 Qualitative Risk Assessment Software

A.6.1 PHA-Pro®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　危险记录和报告软件工具,包括 4 种生产危险分析技术:危险与可操作性研究、假定/一览表、失效模式与影响分析以及初步危险分析;
- 供应商　　挪威船级社软件公司,英国伦敦;
- 定价　　请接洽供应商。

PHA-Pro®是基于 Windows 的危险记录和报告软件工具,在单一集成产品中包括了 4 种生产危险分析技术。可用的技术有危险与可操作性研究、假定/一览表、失效模式与影响分析以及初步危险分析。可达 10×10 的风险矩阵完全由用户定制,能用于对后果、安全措施和建议的严重性和可能性进行排序。全面的建议管理功能可用于管理典型危险与可操作性研究产生的大量建议。其他特点包括简化复杂任务向导、文件模板、定时备份和自动恢复、拼写检查以及所有标准 windows 功能比如剪切、复制和粘贴、查找、替换和拖放编辑。

A.6.2 PHAROS®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　整合工作危险分析过程及工作许可制度的软件工具；
- 供应商　　EQE 公司，英国伦敦；
- 定价　　根据海上设施数量，每年费用从 5 000 英镑到 5 万英镑。

PHAROS®是一个强大的系统，整合了工作危险分析过程及控制计划和执行危险作业的工作许可制度。软件工具将 EQE 公司多年的经验集成到工作许可制度的设计和实施以及车间危险管理过程的应用中。

系统要素包括危险评估和工作危险分析、工作跟踪和协调（包括维护系统的界面）以及隔离/停工控制。系统通过整合风险评估方法和计算机技术提高了安全性，同时降低了营运成本。

A.6.3 Kyrass®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　安全管理；
- 供应商　　塞维斯特软件公司（www. sydvest. com）；
- 定价　　单用户许可证费用为 20 995 挪威克朗。

Kyrass®是设计用于帮助企业以实用的方式进行安全管理的软件工具，可用来记录和管理危险源。Kyrass®可识别风险降低措施及其优先级，并有助于记录审查、修订和评价。Kyrass®安全管理软件工具目前还只是适合挪威人使用的软件工具（例如，其用户界面使用的是挪威语）。

A.6.4 Sabaton®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　失效模式与影响分析以及故障模式影响与危害度分析；
- 供应商　塞维斯特软件公司(www. sydvest. com)；
- 定价　　Sabaton FMEA® 9 500 挪威克朗(约 1 160 欧元/1 500 美元)；Sabaton FMEAPro® 19 500 挪威克朗(约 2 390 欧元/3 090 美元)。

Sabaton®是支持失效模式与影响分析(FMEA)以及故障模式影响与危害度分析(FMECA)的分析软件工具。失效模式与影响分析以及故障模式影响与危害度分析通常用于产品和系统开发,以揭示可能的失效和失效模式以及这些失效的影响。分析结果一般应用于设计改进提议,目的是消除系统失效或减轻组件失效的影响。使用 Sabaton®开始新分析只要简单地在模板中进行选择或完全通过用户自行定义。Sabaton®可根据国际标准支持用户进行失效模式与影响分析及故障模式影响与危害度分析,国际标准包括 ISO 9000、SAE J1739、SAE ARP5580、IEC 60812、BS 5760-5 或 MIL-STD 1629。

A.7　偶发事件与意外事故的报告和分析 Reporting and Analysis of Incidents and Accidents

A.7.1　ProSafe®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　记录意外事故信息,包括对趋势及准备定义的模式的概率进行分析和报告；
- 供应商　EQE 公司,英国伦敦；
- 定价　　根据海上设施数量,费用从 5 000 英镑到 15 万英镑。

ProSafe®是为油气业开发的安全和预防损失系统，可以从任何损害或可能损害人员、环境、资产或公司信誉的意外事故中获取信息。系统然后分析这些信息并生成报告(图形、表格、文字)。软件的数据挖掘能力使说明的趋势和模式有助于集中资源部署，避免将来的损失。

Prosafe®内置的数据词典使用户可以改变系统以加入自己的术语和语言。其可扩展性使软件的应用即能够跨越多个地理位置，又能作为单一部门系统来使用。

A.8　风险管理软件 Risk Management Software

A.8.1　软件工具 Hazard Log Database Management®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　危险的记录和管理；
- 供应商　阿特金斯公司，英国布里斯托；
- 定价　　一次性购买 7 500 英镑，以及系统定制/客户需求(通常 3 000 英镑)。

阿特金斯公司的 Hazard Log Database Management®软件工具是基于英国国防部标准 00-56 的安全危险/风险管理要求而开发的。目前在许多英国国防部项目中得到应用，从全船项目到岸基设施，以及三国(英国/法国/意大利)海军防卫通讯项目。

此外，Hazard Log Database®还应用于伦敦码头区轻轨的路厄森延长线，以及英国、欧洲和亚洲许多其他民用项目和防卫项目。

阿特金斯公司的 Hazard Log Database Management® 软件工具基于

Microsoft Access 2®,可在个人计算机或网络环境中运行。

软件工具的明显优势在于为管理系统安全性提供了系统化、可跟踪的方法,方法符合公认的标准程序。软件工具为管理采纳安全风险降低措施及行动提供了一个有效途径,并为最终安全认证提供了合适的置信水平。

阿特金斯公司可对软件工具进行定制,以满足评估系统应用的特定需求以及管理当局的要求。

软件工具的每一份拷贝都需要单独的许可证。

如果合同中有一些系统部件需要多次使用软件工具,那么价格可以不同的方式构成,阿特金斯公司愿意就这些问题进行坦率的商讨。

A.8.2 Prism®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　安全管理审核软件工具,安全管理性能评估;
- 供应商　ERS 技术公司,英国;
- 定价　无可用信息。

PRISM®是通过使用结构化、系统化方法来深入一个组织每一个层面的审核软件工具。通过面谈及检查,审核软件工具可以获取已经记录的管理系统及其实施的全面信息。

软件已应用于离岸和岸上油气业及其他行业,为公司安全管理系统的发展状态提供评估。

A.8.3 Riskplot II®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　风险总计及呈现软件工具,包括风险概述、频数(f-N)数据、风险样例和支配事件列表的输出;
- 供应商　四元素公司,英国伦敦;
- 定价　单用户许可证 7 900 英镑。

RISKPLOT®是一款风险总计及呈现软件工具。目前正在为英国健康与安全管理局开发修订版。输出包括风险概述、频数（f-N）数据、风险样例和支配事件列表，并考虑以下因素对每个场景的风险进行计算：

- 风向、风速和风的稳定性；
- 特定时间段内受影响的人数；
- 人员在室内/室外、固定（如在住处）或移动（如驾驶汽车）；
- 地形影响（比如存在山丘或悬崖）；
- 事件发生在一个固定地点、多个地点还是沿管线源（如管线）分布。

A.8.4 ORBIT Offshore®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　基于离岸风险的检测软件工具；
- 供应商　挪威船级社软件公司，挪威霍威克；
- 定价　　请接洽供应商。

ORBIT Offshore®是一款使用了挪威船级社基于风险检测（RBI）技术以帮助用户优化其检测管理程序的软件工具。挪威船级社的基于风险检测技术的说明见 DNV RP-G 101“顶边固定机械设备基于风险检测的推荐准则”，可用于海洋环境中对压力设备因腐蚀、冲蚀和破裂所致的风险进行计算。

ORBIT Offshore®通过有效的检测和维护，可以最大限度地减少生产损失和停工时间，帮助用户维持其离岸平台的高生产率和可靠性，并能按用户指定的级别帮助管理安全性和设备完整性。

软件可以帮助用户系统而有效地达到目标。用户能对顶边结构及浮式生产储卸装置（FPSO）的生产和公用设施系统及设备的风险进行量化。风险的定义可根据潜在人命丧失和/或成本。这样就能根据每次检测成本所能降低的最大风险，制定符合成本效益的检测计划。

A.8.5 BowTieXP®国际钻井承包商协会版本和 Black BowTieXP®

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　通过“蝶形结图”的图形界面来管理人员、环境、资产和名誉的主要风险；
- 供应商　加沃纳 BV 公司，荷兰；
- 定价　最新价格信息请访问站点：www. bowtiexp. com。

BowTieXP®可帮助公司分析和管理人员、环境、资产和名誉的主要风险。BowTieXP®生成的报告可成为健康、环境与安全案例的组成部分，能传递给负责关键安全活动以及设备日常管理的人员。BowTieXP®还有为满足离岸业要求而进行了优化的国际钻井承包商协会(IADC)专门版本。BowTieXP®支持国际钻井承包商协会及健康与安全管理局的新案例指导准则，根据案例指导准则模板能更容易更有效地生成健康与安全管理局案例。

BowTieXP®产品套件要比其他蝶形结图软件工具功能更丰富，可以将风险分析同事故数据进行比较测试(Black BowTieXP®附加组件)。BowTieXP®产品套件(标准版、高级版、服务器版、RKM 版及 Black BowTieXP®)还具有对同时进行的作业进行建模及许多其他先进的风险分析特色。BowTieXP®和 Black BowTieXP®还整合了得到认可的事故调查系统如 TOP-SET®(证实有超过 20 年的跟踪记录)，包括可应用于更有效事故调查的新 TOP-SET® BlackBox 软件工具。

BowTieXP®为风险管理过程提供了结构化的方法，并能保证确定的控制措施与公司业务及个人责任相互关联。

蝶形结图形界面为风险管理过程提供了非常有用的表达方式，这样风险管理过程就易于被公司的所有层面理解，同时也简化了数据的录入。

A.8.6 THESIS

以下是这款软件功能、供应商、定价及主要特点的简要介绍。

- 功能　　通过“蝶形结图”的图形界面来管理人员、环境、资产和名誉的主要风险；
- 供应商　ABS 咨询公司，英国沃灵顿；
- 定价　　根据许可证数和需要的模块价格为 500～2 000 英镑。

THESIS(健康、环境和安全信息系统)是能有效说明如何实现设备安全管理系统的软件工具。软件能帮助公司/营运商对业务面临的危险和风险进行分析和管理，并图形化显示和说明危险、控制、风险降低措施以及企业健康、环境与安全活动之间的关系。

THESIS 最初是由壳牌公司开发的应用软件工具，现在同 ABS 公司一起进行开发。软件基于蝶形结图概念开发，图形化显示如何控制危险及如何将其相关风险降低到符合最低合理可行原则(ALARP)。这是一款理想的审核软件工具，记录了信息的出处及获取信息的参考来源。

蝶形结图形界面为风险管理过程提供了非常有用的表达方式，这样风险管理过程就易于被公司所有层面理解，同时也简化了数据的录入。

名词解释

下述定义均与相关的 ISO 术语(ISO/IEC 指南 73:2002)一致。

接受准则(Acceptance criteria)(针对风险)——用于表述可以为问题活动所接受的风险等级准则,限于高等级风险的表述。

意外事件(Accidental event)——可能引起人命、健康丧失或者环境、财产损失的事件或串联事件。

意外效应(Accidental effect)——意外事件的结果,表述为热流、冲击力或能量、加速度等,是用于安全评价的基础。

急性释放(Acute release)——通常缘于偶发事件或意外事故而以排出、排放或暴露形式突然释放。

最低合理可行原则(ALARP (As Low as Reasonably Practicable))——说明通过书面、系统的程序,风险等级得到了降低,因而可能无法确定进一步的措施,除非成本与收益非常不成比例。

屏障元素(Barrier element)——自身不足以执行某一屏障功能的屏障系统组成部分。

屏障功能(Barrier function)——计划用于预防、控制或缓解非期望事件或事故的功能。

屏障(或风险)影响因素(Barrier (or risk) influencing factor)——影响屏障系统性能的条件。

屏障系统(Barrier system)——设计并实施以执行一个或多个屏障功能的技术、人为和/或组织措施。

沸腾液体膨胀蒸气爆炸(BLEVE)——定义为装载油气的容器因受到火灾载荷的加热而破裂。

因果分析(Causal analysis)——确定导致顶事件发生的潜在情形组合的过程。

后果(Consequence)——一起事件的结果。

后果评价(Consequence evaluation)——对缘于事故如火灾和爆炸载荷的物理效应的评估。

应急规划(Contingency planning)——为处理紧急情况,包括实际制定应急行动而提供设施、培训及钻探的规划。

(危险的)控制(Control (of hazards))——为预防升级而限制危险事件的范围和/或持续时间。

成本/收益评价(Cost/benefit evaluation)——成本与收益的定量评估和比较。在收益就是降低安全性或环境危害的现实情况下意指安全措施或环境保护措施。

慢性释放(Chronic release)——以排出、排放或暴露形式连续或持续释放。

已定义危险与事故状态(Defined situations of hazard and accident)——根据作业的设计意外事件、涉及风险暂时增加的危险和意外情况以及范围较小的意外事件,作业中的应急准备应该能够处理的一些可能事件。

设计意外事件(Design Accidental Event)——为满足已定义的风险接受准则而用于海上设施布局、定尺寸和使用以及全部作业基础的意外事件。

设计意外载荷(Design Accidental Load)——功能或系统在所需时间区间内为满足已定义的风险接受准则而应承受的最大意外载荷。

计算意外事件(Dimensioning Accidental Event)——见"设计意外事件"。

计算意外载荷(Dimensioning Accidental load)——见"设计意外载荷"。

安全与应急准备措施的有效性分析(Effectiveness analysis of safety and emergency preparedness measures)——记录安全与应急准备功能要求满足情况的分析。

应急准备(Emergency preparedness)——如果发生了危险或意外情况,为保护人员及环境资源和资产,在应急组织管理下计划实施的技术、作业及组织措施。

应急准备分析(Emergency preparedness analysis)——分析包括确定已定义的危险和事故状况,包括计算意外事件、确定应急准备的功能要求以及应急准备措施。

应急准备组织(Emergency preparedness organisation)——组织的计划、成立、培训并训练目的是为了处理发生的危险或意外情况。

环境资源(Environmental resource)——包括生物群体或栖息地,定义为:

(生物群体)(Stock)——在一定时间一定地理区域内出现的一群生物个体。

（或者）(Alternatively)——单独在一定地理区域内繁殖的某一物种的所有个体。

（栖息地）(Habitat)——几种生物出现并相互影响的一个有限区域，比如海滩。

环境安全(Environment safety)——可能造成损害的意外溢出所导致的环保安全。

事态加剧(Escalation)——危险事件或系列事件的后果加大。

事态加剧因素(Escalation factor)——因失去控制及缓解或恢复能力而导致风险加大的情况。

逃生(Escape)——水面设施人员（及潜水员）采取的避免事故发生区域及事故后果影响到其庇护区域的行动。

逃生通道(Escape way)——平台上特别指定的通道路线，从危险区域到集合区、救生艇站或庇护区。

确立应急准备(Establishment of emergency preparedness)——基于风险及应急准备分析，涉及计划和实施适当应急准备措施的系统化过程。

撤离(Evacuation)——从庇护区通过专用撤离方法放弃海上设施。通常主要考虑紧急撤离，因为预防性撤离不需要太多的撤离资源。

事件树分析(Event Tree Analysis)——为确定一个特定危险事件所导致的选择性潜在场景而进行的归纳分析。可用于定量确定危险事件所导致的不同后果的概率或发生率。

故障树分析(Fault Tree Analysis)——归纳定量分析技术，用于确定失效和事故的原因及量化其概率。

安全与应急准备的功能要求(Functional requirements to safety and emergency preparedness)——针对安全及应急准备措施有效性的可验证要求，应确保在设计和作业中满足安全目标、风险接受准则、管理机构的最低要求以及已制定的标准。

内控(Internal control)——为确保工作符合所有要求和规范而实施的所有管理措施。

主安全功能(Main safety function)——为确保人员不直接立即暴露于危险并以有组织的方式到达安全区域而必须保持的安全功能，安全区域在设施上或可以通过可控撤离到达。

重大事故(Major accidents)——可能导致多人死亡（通常 5 个或更多）的事故，

经常由油气泄漏或严重结构损坏所致。

物资损失安全(Material damage safety)——根据生产延误及装备和结构重建的意外后果而涉及的设施、设施结构和设备安全。

缓解(Mitigation)——限制特定事件的任何负面后果。

集合点(Muster Station)——在紧急情况下撤离或放弃设备之前人员可以安全集合的地点。

集合区域(Muster area)——平台上人员可以躲避意外情况直至登上救生艇的区域。

职业事故(Occupational accidents)——与工作场所危险有关的事故(跌倒、滑倒、挤压等),而不是油气在压力下的危险。这些事故通常涉及单个人员。

人员安全(Personnel safety)——所有参与油田作业人员的安全。

概率(Probability)——某一事件可能发生的限度

可靠性分析(Reliability analysis)——分析失效情况及原因、检查、维护和修理以及工作时间和故障时间的定量评估。

残余意外事件(Residual Accidental Event)——海上设施设计时没有考虑到的意外事件,因而将会成为海上设施风险等级的一部分。

残余风险(Residual risk)——风险处理后剩余的风险。

风险(Risk)——一起事件的概率与其后果的组合

风险接受(Risk acceptance)——接受某一风险的决策

风险分析(Risk analysis)——系统使用信息以识别风险源并说明风险。

风险评估(Risk assessment)——风险分析和风险评价的全部过程。

风险避免(Risk avoidance)——不介入风险情况的决策或摆脱风险情况的行动。

风险控制(Risk control)——实施风险管理决策的行动。

风险评价(Risk evaluation)——将预计风险同给定风险准则进行比较以确定风险重要性的过程。

风险识别(Risk identification)——发现、列出风险因素并辨别其特征的过程。

风险管理(Risk management)——协调涉及风险的行动以指导并管理组织。

风险管理系统(Risk management system)——组织的管理系统中涉及管理风险的一系列因素。

风险感知(Risk perception)——基于一系列价值或利害关系,利益相关者看待风险的方式。

风险降低(Risk reduction)——所采取的减少涉及风险的概率和/或负面后果的

行动。

风险转移(Risk transfer)——为了风险与另一方分担损失或利益。

风险处理(Risk treatment)——选择及实施措施以改变风险的过程。

风险目标(Safety goals)——通过具体的目标来度量油田设施作业的安全性。这些目标应有助于避免事故或抵御事故后果。

风险目标(Safety objective)——作业应关注的人员、环境及资产安全目标。

严重事故(Serious accidents)——见“重大事故”

庇护区(Shelter area)——平台上全体人员紧急情况下可以在一段特定时间内保持安全的区域。

利益相关者(Stakeholder)——能够影响风险、被风险所影响、或认为自己被风险所影响的任何个人、团体或组织。

操作事故(Working accidents)——与其他危险而不是油气在压力下的危险相关的事故(跌倒、挤压等),通常涉及单个人员。

最坏情况后果(Worst case consequence)——危险事件导致的健康、环境与安全的最坏后果。如果发生,所有重要的防御措施一定已经失效。

缩略语

AIR	Average Individual Risk 平均个体风险
AIS	Automatic Identification System 自动识别系统
ALARP	As Low As Reasonably Practicable 最低合理可行原则
ARCS	Admiralty Raster Chart Services 海军光栅海图服务
ARPA	Automated Radar Plotting Aid 自动雷达标绘仪
bara	bar absolute 绝对压力
barg	bar gauge (overpressure) 棒规(过压)
BBD	Barrier Block Diagram 屏障方框图
bbls	barrels 桶
BD	Blowdown 放空
BFETS	Blast and Fire Engineering for Topside Systems 顶边系统爆炸冲击与消防工程
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion 沸腾液体膨胀式蒸气爆炸
BOP	Blowout Preventer 井喷防止器
BORA	Barrier and Operational Risk Analysis 屏障与营运风险分析
CAD	Computer Aided Design 计算机辅助设计
CBA	Cost Benefit Analysis 成本效益分析
CCA	Cause-Consequence Analysis 因果分析
CFD	Computational Fluid Dynamics 计算流体力学
CPA	Closest Point of Approach 最近会遇点
CPP	Controllable Pitch Propeller 可调螺距螺旋桨,调距螺旋桨
CSE	Concept Safety Evaluation 概念安全性评价
DAE	Design Accidental Events 设计意外事件
DAL	Design Accidental Loads 设计意外载荷

DFU	Defined situations of hazard and accident 已定义危险与事故状态
DHSV	DownHole Safety Valve 井下安全阀
DP	Dynamic Positioning 动力定位
dwt	Dead Weight (tonnes) 载重量(吨)
E&P	Exploration and Production 勘探与生产
E&P Forum	Previous name of organisation now called OGP 勘探与生产论坛(组织原名称,现为 OGP)
EER	Escape, Evacuation and Rescue 逃生、撤离和救援
EESLR	Risk due to explosion escalation by small leaks 因小泄漏而使爆炸升级所产生的风险
EFSLR	Risk due to fire escalation by small leaks 因小泄漏而使火灾升级所产生的风险
EIA	Environmental Impact Assessment 环境影响评价
EIF	Environmental Impact Factor 环境影响因素
EQDC	Emergency Quick DisConnector 应急快速分离器
ESD	Emergency Shut Down 应急切断
ETA	Event Tree Analysis 事件树分析
Ex	Explosion [protected] 爆炸(保护型)
FAR	Fatal Accident Rate 死亡事故率
FCC	Frigg Central Complex 弗丽嘉中央综合设施
FEM	Finite Element Method 有限元法
Fi-Fi	Fire Fighting 消防,灭火
FLACS	Flame Accelerator Software 促燃爆炸仿真软件
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis 失效模式与影响分析
FPS	Floating Production System 浮式生产系统
FPSO	Floating Production, Storage and Off-loading unit 浮式生产储卸装置
FPU	Floating Production Unit 浮式生产平台
FRC	Fast Rescue Craft 快速救援艇
FSU	Floating Storage Unit 浮式储油装置
FTA	Fault Tree Analysis 故障树分析

GBS	Gravity Base Structure 重力基座结构
GIR	Group Individual Risk 群体-个体风险
GIS	Geographical Information System 地理信息系统
GoM	Gulf of Mexico 墨西哥湾
GPS	Global Positioning System 全球定位系统
GR	Group Risk 群体风险
GRP	Glass fibre Reinforced Plastic 玻璃纤维增强塑料
GRT	Gross Register Tons 总注册吨位
HAZID	Hazard Identification 危险识别
HAZOP	Hazard And Operability Study 危险与可操作性研究
HC	Hydrocarbon 碳氢化合物,烃
HCL	Hybrid Causal Logic 混合因果逻辑
HCLIP	Hydrocarbon Leak and Inventory Project 油气泄漏与库存项目
HES	Health, Environment and Safety 健康、环境与安全
HIPPS	High Integrity Pressure Protection System 高完整性压力保护系统
HOF	Human and Organisational Factors 人为与组织因素
HR	Human Reliability 人因可靠性
HSE	Health and Safety Executive 健康与安全管理局
IEC	International Electro-technical Commission 国际电工委员会
IMO	International Maritime Organization 国际海事组织
IR	Individual Risk 个体风险
IRPA	Individual Risk per Annum 每年个体风险
ISO	International Organisation for Standardisation 国际标准化组织
JIP	Joint Industry Project 联合工业项目
LCC	Life Cycle Cost 生命周期成本
LEL	Lower Explosion Level 爆炸下限
LFL	Lower Flammability Level 可燃性下限
LNG	Liquefied Natural Gas 液化天然气
MIRA	Environmental risk analysis ('Miljørettet risikoanalyse') 环

境风险分析

MMI　Man-Machine Interface 人机界面

MNOK　million Norwegian kroner 百万挪威克朗

MOB　Man Overboard 船员落水

MODU　Mobile Offshore Drilling Unit 移动式离岸钻井平台

MP　Main (propulsion) Power 主(推进)动力

MSF　Module Support Frame 模块支持架构

MTO　Man, Technology and Organisation 人、技术和组织

NORSOK　Norwegian offshore standardisation organisation ('Norsk Sokkels Konkurranseposisjon') 挪威石油标准化组织

nm　Nautical Mile 海里

NMD　Norwegian Maritime Directorate 挪威海事管理局

NOPSA　National Offshore Petroleum Safety Authority [Australia] 国家海上石油安全局(澳大利亚)

NPD　Norwegian Petroleum Directorate 挪威石油管理局

NPV　Net Present Value 净现值

NTNU　Norwegian University of Science and Technology 挪威科技大学

NTS　Norwegian Technology Standards Institution 挪威技术标准协会

OLF　The Norwegian Oil Industry Association ('Oljeindustriens Landsforening') 挪威石油工业协会

OR　Overall Risk 总风险

OTS　Operational Condition Safety ('Operasjonell Tilstand Sikkerhet') 安全运行条件

P&ID　Piping and Instrumentation Drawing 管路与仪表流程图

PETRAD　Program for Petroleum Management and Administration 石油经营与管理计划

PFEER　Prevention of Fire and Explosion and Emergency Response 火灾爆炸预防与应急响应

PFP　Passive Fire Protection 被动消防

PGS　Petroleum Geo-Services ASA 挪威油田服务集团

PHA	Preliminary Hazard Analysis 初步危险分析
PLATO	Software for dynamic event tree analysis 动态事件树分析软件
PLL	Potential Loss of Life 潜在人命丧失
PLS	Progressive Limit State 累进极限状态
POB	Personnel On Board 在船人员总数
PRS	Position Reference System 定位参照系统
PSA	Petroleum Safety Authority [Norway] 挪威石油安全管理局
PSA	Probabilistic Safety Assessment 概率安全评估
PSD	Process Shut Down 过程切断
QA	Quality Assurance 质量保证
QC	Quality Control 质量控制
QM	Quality Management 质量管理
QP	[Frigg] Quarters Platform [弗丽嘉]居住平台
QRA	Quantified Risk Assessment 量化风险评估
R&D	Research and Development 研发
RABL	Risk Assessment of Buoyancy Loss 浮力损失风险评估
RAC	Risk Acceptance Criteria 风险接受准则
RACON	Radar signal amplification 雷达信号放大
RAE	Residual Accidental Events 剩余意外事件
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability, Safety 可靠性、可用性、可维护性和安全性
RIF	Risk Impact Factor 风险影响因素
RNNS	Risk Level [project] ('Risiko Nivå Norsk Sokkel') 风险等级(项目)
ROV	Remote Operated Vehicle 遥控潜水器,水下机器人
RRM	Risk Reducing Measure 风险降低措施
SAFOP	Safety and Operability Study 安全性与可操作性研究
SAR	Search and Rescue 搜救
SBV	Standby Vessel 守备船
SCR	Safety Case Regulations 安全案例规范
SIL	Safety Integrity Level 安全完整性水平

SJA	Safe Job Analysis 安全工作分析
SLR	Risk due to small leaks 小泄漏引起的风险
SOLAS	Safety of Life at Sea 海上人命安全公约
SSIV	SubSea Isolation Valve 水下隔离阀
ST	Shuttle Tanker 穿梭油船
SUPER-TEMPCALC	Software for 2D temperature analysis 二维温度分析软件
TASEF-2	Software for 2D temperature analysis 二维温度分析软件
TCP2	[Frigg] Treatment Platform 2 [弗丽嘉]2 号作业平台
TH	Thruster 推力器
TLP	Tension Leg Platform 张力腿平台
TP1	[Frigg] Treatment Platform 1 [弗丽嘉]1 号作业平台
TR	Temporary Refuge 临时避难所
TRA	Total Risk Analysis 总风险分析
TST	Technical Safety Condition ('Teknisk SikkerhetsTilstand') 技术安全状况
TTS	Technical Condition Safety ('Teknisk Tilstand Sikkerhet') 安全技术条件
UEL	Upper Explosive Limit 爆炸上限
UFL	Upper Flammability Limit 可燃性上限
UPS	Underwater Production System 水下生产系统
USFOS	Software for non-linear and dynamic analysis of structures 结构非线性和动态分析软件
VEC	Valued Ecological Component 重要的生态组成部分
VHF	Very High Frequency 甚高频
VOC	Volatile Organic Compounds 挥发性有机化合物
VTS	Vessel Traffic System 船舶交管系统
WOAD	Worldwide Offshore Accident Database (ref. DNV) 世界离岸事故数据库

参考文献

AEA (1997) Hydrocarbon Release Statistics Review. Warnington; AEA Technology; 1998 Jan. Report No. : 16189000/01.

Amdahl, J. , Eberg, E. , Holmås, T. , Landrø, H. et al. , (1995) Ultimate Collapse of Offshore Structures exposed to Fire. Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; 1995 June 18-22; Copenhagen, Denmark. New York: ASME Press.

AME (2003) Pipeline and Riser Loss of Containment Data for Offshore Pipelines (PARLOC) 2001. Guildford: Advanced Mechanics & Engineering Ltd (AME).

American Iron and Steel Institute (1979) Fire-safe structural steel. A design guide. Washington DC.

Andersen, L. B. (1998) Stochastic modeling for the analysis of blowout risk in exploration drilling. Reliability Engineering and System Safety 61:53-63.

ANP (2001) P-36 accident analysis. Petrobras; ANP/DPC inquiry commission report; July 2001.

API (1976) Recommended Practice for the Design and Installation of Pressure-Relieving Systems in Refineries. Part 1—Design, API Recommended Practice 520. Washington; American Petroleum Institute.

API (1997) Guide for Pressure Relieving and Depressuring Systems, RP 521. Washington DC: American Petroleum Institute.

Aven, T. (1992) Reliability and Risk Analysis. Elsevier: London.

Aven, T. (2003) Foundations of Risk Analysis—A Knowledge and Decision Oriented Perspective, Wiley: N New York.

Aven, T. , Sklet, S. and Vinnem, J. E. (2006) Barrier and operational risk analysis of hydrocarbon releases (BORA-release); Part I, Method description, Journal of Hazardous Materials, A137, 681-691.

Aven, T. and Vinnem, J. E. (2007) Risk Management, with Applications from the Offshore Petroleum Industry. Springer Verlag: London.

Bea, R. and Moore, W. (1994) Reliability based Evaluations of Human and Organisation

Errors in Reassessment and Requalification of Platforms. In: Proceedings of the 13th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; 1994 February 27-March 3; Houston, USA.

Bea, R. (1995) Quality, Reliability, Human and Organisation Factors in Design of Marine Structures. Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; 1995 June 18-22; Copenhagen, Denmark. New York: ASME Press.

Borrevik, L. N. and Horve, M. (2004) When the oil industry lost its 'innocence' (In Norwegian only). Stavanger Aftenblad. 2004 March 10.

Bäckström, O. (2003) Pilot project fault tree analysis for Statfjord A (in Swedish only). Stockholm; Relcon; 2003 May. Report No. : 99161-R-005.

Chen, H. (2002) Probabilistic Evaluation of FPSO—Tanker Collision in Tandem Off-loading Operation. Trondheim; NTNU. Dr. ing Thesis.

Chen, H. (2006) Summary, Safety of DP drilling operations. Kjeller; Scandpower Risk Management; 2006 Jun. Report No. : 61. 000. 000.

Chen, H. and Moan, T. (2005) DP incidents on Mobile Offshore Drilling Units on the Norwegian Continental Shelf. In: Kolowrochi, K. (ed.). Proceedings ESREL 2005. Balkema, London.

Chen, H., Moan, T. and Verhoeven, H. (2006a) Barriers to prevent loss of position for dynamically positioned mobile offshore drilling units on the Norwegian Continental Shelf. In: Soares, C. (ed.). Proceedings ESREL 2006. Balkema, London.

Chen, H., Moan, T. and Verhoeven, H. (2006b) Critical DGPS failures on dynamically positioned mobile offshore drilling unit on the Norwegian Continental Shelf. In: Soares, C. (ed.). Proceedings ESREL 2006. Balkema, London.

Cox, A. W., Lees, F. P. and Ang, M. L. (1991) Classification of hazardous locations. Institution of Chemical Engineers: UK.

Crawley, F., Preston, M. and Tyler, B. (2000) HAZOP: Guide to Best Practice for the Process and Chemical Industries. Institution of Chemical Engineers: UK.

DNV (1981a) Causes and consequences of fires and explosions on offshore platforms. Statistical survey of Gulf of Mexico data. Høvik; DNV; 1981 Jan. Report No. : 81-0057.

DNV (1981b) Technical Note—Fixed Offshore Installations—Impact Loads from Boats. Høvik; DNV. Report No. : TN-202.

DNV (1993) Causes and consequences of fires and explosions on offshore platforms. Statistical survey of Gulf of Mexico data. Høvik, DNV. Report No. : 93-3401.

DNV (1998a) WOAD, Worldwide Offshore Accident Database. Høvik; DNV.

DNV (1998b) Ignition Modelling, Time Dependent Ignition Probability Model. Høvik;

DNV; 1998 Feb. Report No. : 96-3629.

DNV (1998c) Benchmark of JIP Ignition Model against Experience Data. Høvik; DNV; 1998 Oct. Report No. : 98-3290.

Drangeid, S. O. , Grande, B. V. and Skriver, J. (2005) Analysis of causal relationships for unwanted occurrences with offshore cranes (In Norwegian only). Stavanger; Scandpower; 2005 Jun. Report No. : 33. 790. 007.

Eknes, M. L. and Moan, T. (1996) Modelling of Escalation due to Explosion. In: Proceedings of the 15th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; 1996 June 16-20; Florence, Italy.

Elf Petroleum Norway (1998) Health, Safety and Environment. Annual report for 1997. Stavanger; Elf; 1998 Apr.

EPA (2004) Exxon Valdez, article in webpages, updated 23. 12. 2004, http://www. epa. gov/oilspill/exxon. htm

ERA (1998) Fire and Explosion Engineering, Offshore Installations—Conference Proceedings, 1 December 1998, ERA Report 98-0958. Leatherhead: UK.

Ersdal, G. and Friis-Hansen, P. (2004) Safety barriers in offshore drill rigs derived from accident investigation. Proceedings of the 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering; Vancouver, Canada.

Exprosoft (2006) SINTEF Offshore Blowout Database, http://www. exprosoft. com/ blowout. htm

Fanneløp, T. K. (1994) Fluid mechanics for industrial safety and environmental protection. Elsevier: London.

Fay, L. A. (1969) The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea. Boston; Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology; 1969 May.

Gowan, R. G. (1978) Developments in Fire Protection of Offshore Platforms. Applied Science Publisher Ltd. : London.

Haddon, W. (1980) The best strategies for reducing damage from hazards of all kinds. Hazard Prevention, September/October 1980: 8-12.

Haugen, S. (1991) Probabilistic Evaluation of Frequency of Collision between Ships and Offshore Platforms. Trondheim; NTNU; Dr. ing. Thesis. Report No. : MTA 1991:80.

Haugen, S. (2005) Risk analysis of maritime systems. Trondheim; Safetec; 2005 Sep. Report No. : ST-20649-RS-3-Rev00.

Haugen, S. , Myrheim, H. and Stemland, E. (2004) Qantitative risk analysis of decommissioning activities. Trondheim; Safetec; 2004 Aug. Report No. : ST-20447-RA-1-Rev02.

Haver, S. and Vestbøstad, T. M. (2001) The storm outside Mid Norway 10-11 November, 2001 (In Norwegian only). Stavanger; Statoil; 2001 Nov. Report No.: PTT-KU-MA-024.

Henderson, Y. and Haggard, H. W. (1943) Noxious Gases. 2nd ed. Reinhold Publishing Co.: New York.

Henley, E. J. and Kumamoto, H. (1981) Reliability Engineering and Risk Assessment. Prentice Hall Inc.: New Jersey.

Holand, P. (1997) Offshore Blowouts Causes and Control. Gulf Publishing Company: Houston.

Holen, J. and Magnussen, B. F. (1990) KAMELEON FIRE E-3D—A Field Model for Enclosed Pool Fires. Trondheim; SINTEF. Report No.: STF15 F90010.

HSE (1974) Management of Health and Safety at Work Act. HMSO: London.

HSE (1992) Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations. HMSO: London.

HSE (1993) Drag anchors for floating systems. London; HMSO. Report No.: OTH 93 395. http://www.hse.gov.uk/research/othpdf/200-399/oth395.pdf

HSE (1995a) Prevention of Fire and Explosion, and Emergency Response regulations. HMSO: London.

HSE (1995b) Offshore Installations and Pipeline Works (Management and Administration) Regulations. HMSO: London.

HSE (1996) The Offshore Installations and Wells (Design and Construction, etc.) Regulations. HMSO: London.

HSE (1997a) The Effectiveness of Collision Control and Avoidance Systems. London: HMSO; 1997 Jan. Report No.: DST-96-CR-052-01.

HSE (1997b) Offshore Hydrocarbon Releases Statistics. London: HMSO; 1997 Dec. Report No.: OTO 97 950.

HSE (1998) Development of the Oil and Gas Resources of the United Kingdom. London: HMSO.

HSE (2002) Offshore Hydrocarbon Releases Statistics. London: HMSO. http://www.hse.gov.uk/offshore/statistics/hsr2002/tables.htm

HSE (2003) Ship/platform collision incident database (2001). London: HMSO.

HSE (2004) UK Offshore public transport helicopter safety record (1976-2002). London: HMSO.

HSE (2005a) Accident statistics for fixed offshore units on the UK continental shelf (1980-2003). London: HMSO; 2005; RR349.

HSE (2005b) Accident statistics for floating offshore units on the UK continental shelf

(1980-2003). London; HMSO; 2005; RR353.

HSE (2005c) Safety Case regulations, Health and Safety Executive. HMSO: London.

Høyland, A. and Rausand, M. (1994) System Reliability, Theory, Models and Statistical Methods. John Wiley & Sons, New York.

IEC (2000) IEC 61508—Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Geneva; IEC.

IEC (2003) IEC 61511—Functional safety—safety instrumented systems for the process industry sector. Geneva; IEC.

IEEE (1984) IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic and Sensing Component Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations. Wiley: Hoboken.

Ireland, R. D. (1991) Determination by R. D. Ireland, Sheriff Principal of Grampian, Highland and Islands, in Fatal accident Inquiry into the death of Timothy John Williams on board Ocean Odyssey, 8. 11. 1991.

ISO (1999a) Safety aspects—Guidelines for their inclusion in standards, ISO/IEC Guide 51. Geneva: ISO.

ISO (1999b) Control and Mitigation of Fires and Explosions on Offshore Production Installations—Requirements and Guidelines, International Standards Organisation; Geneva: ISO13702:1999(E).

ISO (2000a) Requirements and guidelines for emergency response. International Standards Organisation; Geneva: ISO15544:2000.

ISO (2000b) Guidelines on tools and techniques for identification and assessment of hazards. International Standards Organisation; Geneva: ISO17776:2000.

ISO (2002) Risk management vocabulary, guidelines for use in standards, ISO/IEC Guide. International Standards Organisation; Geneva: ISO Guideline 73:2002.

ISO (2003) Analysis, design, installation and testing of basic surface safety systems for offshore production platforms. International Standards Organisation; Geneva: ISO10418:2003.

Jensen, F. V. (2001) Bayesian Networks and Decision Graphs. Springer: London.

Jones, J. C. and Irvine, P. (1997) PLATO software for offshore risk assessment: a critique of the combustion features incorporated. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 10(4)259-264.

Kenny, J. P. (1988) Protection of Offshore Installations Against Impact, Background Report. Report No.: OTI 88 535; prepared for Department of Energy.

Kirwan, B. (1994) A Guide to Practical HRA. Taylor and Francis: London.

Kirwan, B. and Ainsworth, L. K. (1992) A Guide to Task Analysis. Taylor and Francis: London.

Kjellén, U. (2000) Prevention of Accidents Through Experience Feedback. Taylor and Francis: London.

Kvitrud, A., Nilsen, L. R., Næss, T. I., Dalsgaard, L. J. and Vinnem, J. E. (2006) In service experiences 1996-2005 in Norway, and risk analysis of anchoring systems. In: Soares, C. (ed.). Proceedings ESREL 2006. Balkema: London.

Lees, F. P. (2004) Lees' Loss Prevention in the Process Industries. 3rd edition. Butterworth-Heinemann: Oxford.

Lord Cullen (The Hon) (1990) The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster. HMSO: London.

Lotsberg, I., Olufsen, O., Solland, G., Dalane, J. I. and Haver, S. (2004) Risk Assessment of Loss of Structural Integrity of a Floating Production Platform due to Gross Errors. Marine Structures 17:551-573.

MMS (2005) Multiple Cable Transit Failures, Safety Alert No. 235, Minerals Management Service, Washington; 2005 Dec.

Morris, M. I., Miles, A. and Cooper, J. P. S. (1994) Quantification of escalation effects in Offshore Quantitative Risk Assessment. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 7(4)337-344.

Mosleh, A., Dias, A., Eghbali, G. and Fazen, K. (2004) An integrated framework for identification, classification, and assessment of aviation systems hazards. Proceedings of the international conference on probabilistic safety assessment and management PSAM7 and European safety and reliability conference; 2004 June 14-18; Berlin, Germany.

Nielsen, D. S. (1976) The Cause Consequence Diagram as a basis for quantitative Accident Analysis. Denmark; RISØ National Laboratory. Report NO.: M-1374.

Nilsen, H., Brude, O. W., Hoel, E., Johansen, et. al. (2005) Development of the Environmental Impact Factor Model for risk assessment of acute oil spills (EIF Acute). In: International Marine Environmental Modeling Seminar (MEMS) conference; 2005 August 23-35; Helsinki, Finland.

Nilsen, L. R. (2005) Marine systems in risk analyses for mobile units (In Norwegian only). University of Stavanger; M. Sc. Thesis; June 2005.

Nilsen, T., Sandøy, M., Rommetveit, R. and Guarneri, A. (2001) Risk-Based Well Control Planning: The Integration of Random and Known Quantities in a Computerized Risk Management Tool. SPE68447.

NMD (1987): regulations of 4 September 1987 No. 857 concerning anchoring/positioning

systems on mobile offshore units, § 6 and § 7. http://www.lovdata.no/for/sf/nh/xh-19870904-0857.html

NMD (1991a): Regulations of 20 December 1991 no 878 concerning stability, watertight subdivision and watertight/weathertight closing means on mobile offshore units. NMD: Oslo.

NMD (1991b): Regulations of 20 December 1991 no 879 concerning ballast systems on mobile offshore units. NMD: Oslo.

NMD (1994): Regulations of 10 February 1994 No. 123 for mobile offshore units with production plants and equipment, § 16. http://www.lovdata.no/for/sf/nh/xh-19940210-0123.html

Noble Denton (2002) FPSO Mooring system integrity study, Rev 02; Noble Denton, London; 2002 Report No.: 2002\A3792-02.

NOPSA (1996) Petroleum (Submerged Lands) (Management of Safety on Offshore Facilities) Regulations 1996. National Offshore Petroleum Safety Authority: Canberra. Statutory Rules 1996 No. 298.

NOPSA (2004) Safety Case Guidelines. National Offshore Petroleum Safety Authority: Canberra.

NORSOK (1996) Technical Safety, Design Principles, S-DP-001, Rev. 2. Standards Norway: Oslo.

NORSOK (1999a) Action and action effects, N-003, Rev. 1. Standards Norway: Oslo.

NORSOK (1999b) Regularity Management and Reliability Technology, Z-016 Rev. 1. Standards Norway: Oslo.

NORSOK (2000) Technical safety, S-001, Rev. 3. Standards Norway: Oslo.

NORSOK (2001) Risk and emergency preparedness analysis, Z-013. Standards Norway: Oslo.

NORSOK (2004a) Structural design, N-001, Rev. 4. Standards Norway: Oslo.

NORSOK (2004b) Design of steel structures, N-004, Rev. 2. Standards Norway: Oslo.

NORSOK (2006) Technical safety, S-001, Draft Edition 4. Standards Norway: Oslo, 2006, August.

NOU (1981) Alexander L. Kielland Accident, NOU Report 1998:11. Oslo.

NOU (1986) West Vanguard Accident, NOU Report 1986:16. Oslo.

NOU (1997) About the SAR Helicopter Service (In Norwegian only). NOU Report 1997:3. Oslo.

NOU (2002) Helicopter safety on the Norwegian continental shelf (In Norwegian only). NOU Report 2002:17. Oslo.

NPD (1980) Guidelines for conceptual evaluation of platform design. Norwegian Petroleum Directorate: Stavanger.

NPD (1990). Regulations Relating to Implementation and Use of Risk Analysis in the Petroleum Activities, Norwegian Petroleum Directorate, Stavanger; 1990, December.

NPD (1992a). Regulations Relating to Explosion and Fire Protection of Installations in the Petroleum Activities, Norwegian Petroleum Directorate, Stavanger, 1992, February.

NPD (1992b). Regulations Concerning Load Bearing Structures, Norwegian Petroleum Directorate, Stavanger, 1992, February.

NPD (1998) Evacuation means, strengths, weaknesses and operational constraints. DNV, Høvik, Norway, DNV Report 98-0561. 1998, December.

NRC (1975) Reactor Safety Study, WASH 1400. Nuclear Regulatory Commission: Washington DC.

Næss, T. I., Nilsen, L. R., Kvitrud, A. and Vinnem, J. E. (2005) Anchoring of installations on the Norwegian Continental Shelf (In Norwegian only). Stavanger; Petroleum Safety Authority.

http://www. ptil. no/NR/rdonlyres/B186B607-98EB-4F25-8B8D-71447322B48B/10306/2005RapportForankring. pdf

OGP (1986) Ocean Ranger Task Force Report. London: OGP; 1986 Dec. Report No. : 7. 2/134.

OGP (1994) Guidelines for the Development and Application of Health, Safety and Environmental Management Systems. London: OGP; 1994 Jul.

OGP (1996) Quantitative Risk Assessment, Datasheet Directory. London: OGP; 1996 Oct. Report No. : 11. 8/250.

OLF (1996) Analysis of Gas Leaks on the Norwegian Continental Shelf 1991-1995 (In Norwegian only). Stavanger; The Norwegian Oil Industry Association; 1996 Apr.

OLF (2000) Guidelines for area based emergency preparedness (In Norwegian only). Stavanger: OLF; 2000.

OLF (2001) Methodology for environmental risk analysis (In Norwegian only). Stavanger: OLF; 2001.

OLF (2004a) OLF 070—Application of IEC 61508 and IEC 61511 in the Norwegian petroleum industry. Stavanger: OLF; 2004.

OLF (2004b) 'Working together for safety' http://samarbeidforsikkerhet. no Opstad, K. and Guénette, C. (1999) Fire on the Sea Surface, Ignitability and Sustainability under various Environmental Conditions. In: 6th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS); 1999 July 5-9; Poitiers, France.

OREDA (1997) Offshore Reliability Data Handbook. 3rd ed. SINTEF: Trondheim.

Paradies, M. and Unger, L. (2000) TapRoot, The system for root cause analysis, problem investigation, and proactive improvement. System Improvements Inc. : Knoxville.

Pearl, J. (2001) Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of plausible inference. Morgan Kaufman: San Mateo.

PSA (2002a) Framework regulations; Petroleum Safety Authority, Norwegian Pollution Control Authority and the Norwegian Social and Health Directorate; Stavanger.

PSA (2002b) The management regulations; Petroleum Safety Authority, Norwegian Pollution Control Authority and the Norwegian Social and Health Directorate; Stavanger.

PSA (2002c) The Facilities regulations; Petroleum Safety Authority, Norwegian Pollution Control Authority and the Norwegian Social and Health Directorate; Stavanger.

PSA (2002d) Activity regulations; Petroleum Safety Authority, Norwegian Pollution Control Authority and the Norwegian Social and Health Directorate; Stavanger.

PSA (2002e) Information duty regulations; Petroleum Safety Authority, Norwegian Pollution Control Authority and the Norwegian Social and Health Directorate; Stavanger.

PSA (2005a) Investigation of the gas leak from 6 " export pipeline from Jotun A (In Norwegian only) PSA 23. 12. 2004. Stavanger; Petroleum Safety Authority.

PSA (2005b) Investigation of the anchor line failures on Ocean Vanguard 14. 12. 2004, Well 6406/1-3. (In Norwegian only) PSA 23. 5. 2005. Stavanger; Petroleum Safety Authority. http://www. ptil. no/NR/rdonlyres/83A74F56-7F2D-470C-9A36-1153AADE50A7/7950/ovgrrappkomprimertny. pdf

PSA (2005c) Trends is risk levels, Main report 2004, Phase 5 (In Norwegian only) Report 05-02, Petroleum Safety Authority; 26. 4. 2005. http://www. ptil. no/NR/rdonlyres/-87F129DD-9FA0-4F7E-A1BB-341D4585B84D/8903/Fase5rapportutenrestriksjoner. pdf

PSA (2006a) Trends is risk levels, Main report 2005, Phase 6 (In Norwegian only) Report 06-02, Petroleum Safety Authority; 28. 4. 2006.

PSA (2006b) Trends is risk levels, Summary report Phase 6; Report 06-04, Petroleum Safety Authority; 28. 4. 2006

Reason, J. (1997) Managing the Risks of Organizational Accidents. Ashgate: Hampshire.

Relcon (2006) RiskSpectrum® software; http://www. riskspectrum. com/

Reliability Analysis Centre (1991) NPRD, Nonelectronic Parts Reliability Data. System Reliability Centre: New York.

Ripley, B. D. (1987) Stochastic Simulation. Wiley: New York. Rosenberg, T. and Nielsen, T. (1995) Blowout Risk Modelling. Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; 1995 June 18-22; Copenhagen, Denmark.

New York: ASME Press.

Royal Commission on the Ocean Ranger Marine Disaster (1984) Report One: The Loss of the Semi-submersible Drill Rig Ocean Ranger and its Crew. St. John's, Newfoundland); 1984 Aug.

Røed, W., Mosleh, A., Vinnem, J. E. and Aven, T. (2007) On the Use of Hybrid Causal Logic Method in Offshore Risk Analysis, submitted to Reliability Engineering and System Safety (to appear).

Safetec Nordic AS (1994) Collide II, Reference Manual, Rev 2. Trondheim; Safetec; 1994 Mar. Report No. :ST-91-RF-032-02

Safetec Nordic AS (1996) Coast Database, Rev. 1. Trondheim; Safetec. http://www.safetec.no/article.php? id=105

Safetec Nordic AS (2002) COAST Norway, Development of COAST for Norwegian waters, Rev 00. Sandvika; Safetec; 2002 Oct. Document No. ST-20135-TS-1-Rev 00 http://www.safetec.no/article.php? id=105

Sandvik, P. (1988) Hydrodynamic Effects from Subsea Gas Blowouts. Safetec Nordic, Trondheim; 1988 Feb. Report No.: ST-87-RR-007-02. Appendix 2 to RABL project report No 1.

Sax, N. I. (1984) Dangerous Properties of Industrial Materials. 6th ed. Van Nostrand Reinhold Co.: New York.

Scandpower Risk Management (2004) An Assessment of Safety, Risks and Costs Associated With Subsea Pipeline Disposals. Scandpower; 2004 Sep. Kjeller, Norway; Report No.: 32.701.001/R1.

Scandpower Risk Management (2005a) Safety of DP operations on mobile offshore drilling units on the Norwegian Continental Shelf. Scandpower; 2005 Dec. Kjeller, Norway; Report No. :27.740.114/R5.

Scandpower Risk Management (2006) Ignition Modelling in Risk Analysis. Scandpower; 2006 Feb. Kjeller, Norway; Report No.: 27.390.033/R1.

Schofield, S. L. (1993) A Framework for Offshore Risk Criteria. Liverpool; HSE, Safety Analysis Unit, Offshore Safety Division.

SCI (1992) Interim Guidance Notes for the Design and Protection of Topside Structures against Explosion and Fire, Document 53. Steel Construction Institute.

SCI (1998) Blast and Fire Engineering for Topside Systems, Phase 2. Ascot; SCI. Report No.: 253.

SINTEF (1990) Helicopter Safety Study. SINTEF; 1990 Nov. Trondheim, Norway; Report No.: STF75 A90008.

SINTEF (1992) Handbook for Fire Calculations and Fire Risk Assessment in the Process Industries. SINTEF/Scandpower; 1992 Trondheim, Norway.

SINTEF (1998) Blowout database, Safety and Reliability Department. SINTEF; 1998: Trondheim, Norway.

SINTEF (2005) New knowledge about offshore fires (In Norwegian only) SINTEF NBL, 14 February 2005; Trondheim, Norway; Report No. NBL A04148.

SINTEF (1999) Helicopter Safety Study 2, SINTEF, 1999 15 December. Trondheim, Norway; Report No. : STF38 A99423,

Sklet, S. , Aven, T. , Hauge, S. and Vinnem, J. E. (2005) Incorporating human and organizational factors in risk analyses for offshore installations. In: Kolowrochi, K. (ed.). Proceedings ESREL 2005. Balkema, London.

Sklet, T. , Vinnem, J. E. and Aven, T. (2006) Barrier and operational risk analysis of hydrocarbon releases (BORA-release); Part II, Results from a case study, Journal of Hazardous Materials, A137, 692-708.

Soma, H. (1995) Computer Simulation for Optimisation of Offshore Platform Evacuation. Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; 1995 June 18-22; Copenhagen, Denmark. New York: ASME Press.

Stamatis, D. H. (1995) Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. American Society for Quality: Milwaukee.

Syvertsen, R. (2006) Weight of Importance for Barriers in the Offshore Oil and Gas Industry. MSc Thesis, University of Stavanger; 2006 Jun.

Sørgård, E. , Jødestøl, K. , Hoell, E. and Fredheim, B. (1997) A Stepwise Methodology for Quantitative Risk Analysis of Offshore Petroleum Activities. In: SPE/UKOOA European Environmental Conference; 1997 April 15-16; Aberdeen, Scotland.

Thomassen, O. and Sørum, M. (2002) Mapping and monitoring the safety level. In: SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production; 2002 March 20-22; Kuala Lumpur, Malaysia. SPE paper 73923.

Tinmannsvik, R. K. , Sklet, S. and Jersin, E. (2005) Investigation methodology: Man, Technology, Organisation (In Norwegian only). SINTEF; 2005 Oct. Report No. : STF38 A04422. http://www. ptil. no/NR/rdonlyres/63D64078-11AA-4AC7-931F-A6A6CB790573/0/UlykkesgranskingSTF38A04422. pdf

Tveit, O. (2003) Private communication with O Tveit, Statoil.

UKOOA (2002) FPSO Tandem Loading Guidelines. UKOOA, London; 2002 Mar.

UKOOA (2003a) Fire and explosion guidance: Part 1—Avoidance and mitigation of explosions, Issue 1 UKOOA, London; 2003 Oct.

UKOOA (2003b) Fire and explosion guidance: Part 0—Fire and explosion hazard management, Issue 2 UKOOA, London; 2003 Oct.

UKOOA (2006) Fire and explosion guidance: Part 2—Avoidance and mitigation of fires. UKOOA, London; 2006 Feb. Final draft, February 2006.

Upstream weekly magazine (2002) P-34 alarm sounded in May. 2002 October 14.

Vesely, W. E., Goldberg, F. F., Roberts, N. M. and Haasl, D. F. (1981) Fault Tree Handbook (NUREG-0492), Office of Nuclear Regulatory Research. U. S. Nuclear Regulatory Commission: Washington DC, 1981 Jan.

Vinnem, J. E. (1988) Risk Assessment of Buoyancy Loss, Summary Report. Safetec Nordic, Trondheim, Norway; 1988; Report No.: ST-87-RF-024-01.

Vinnem, J. E. (1997a) On the Sensitivity of Offshore QRA Studies. In: European safety and reliability conference; 1997; Lisboa, Portugal.

Vinnem, J. E. (1997b) Environmental Risk Analysis of Near-Shore Wildcat Well, Approach to Rational Risk Acceptance Criteria, SPE/UKOOA. In: SPE/UKOOA European Environmental Conference; 1997 April 15-16; Aberdeen, Scotland.

Vinnem, J. E. (1998) Blast Load Frequency Distribution, Assessment of Historical Frequencies in the North Sea. Preventor, Bryne, Norway; 1998 Nov. Report No.: 19816-04.

Vinnem, J. E. (1999) Requirements to Standby Vessels; Phase 1—Survey of current Practice (In Norwegian only). OLF, Stavanger, Norway; 1999.

Vinnem, J. E. (2000) Operational safety of FPSOs: Initial summary report. OTO Report No.: 2000:086; HSE, 2001.

Vinnem, J. E. (2003) Operational Safety of FPSOs, Shuttle Tanker Collision Risk, Summary Report, RR113. HMSO: London.

Vinnem, J. E. (2004) Integrated barrier analysis in operational risk assessment in offshore petroleum operations, Proceedings of the international conference on probabilistic safety assessment and management PSAM7 and European safety and reliability conference; 2004 June 14-18; Berlin, Germany.

Vinnem, J. E., Amdahl, J. and Haugen, S. (1987) Case Study 1. Safetec Nordic, Trondheim, Norway; 1987 Sep. RABL Report 6.

Vinnem, J. E., Pedersen, J. I. and Rosenthal, P. (1996a) Efficient Risk Management: Use of Computerized QRA Model for Safety Improvements to an Existing Installation. In: 3rd International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production; New Orleans, USA. SPE paper 35775.

Vinnem, J. E., Haugen, S. and Børresen, R. (1996b) Risk Assessment of Production and

Storage Tankers, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engeneering 188:198-203.

Vinnem, J. E. and Vinnem, J. E. (1998) Risk Levels on the Norwegian Continental Shelf. Preventor, Bryne, Norway; 1998 Aug. Report No. : 19708-03.

Vinnem, J. E. and Hauge, S. (1999) Operational Safety of FPSOs, MP3; Riser Failure due to Inadequate Response to Rapid Wind change. Trondheim; NTNU.

Vinnem, J. E. , Hauge, S. , Huglen, Ø. , Kieran, O. , Kirwan, B. , Rettedal, W. K. , et al. (2000) Systematic Analysis of Operational Safety of FPSOs Reveals Areas of Improvement. In: SPE International Conference on Health, Safety, and the Environment in Oil and Gas Exploration and Production; 2000 June 26-28; Stavanger, Norway.

Vinnem, J. E. , Hokstad, P. , Saele, H. , Dammen, T. , Chen, H. , et al. (2002) Operational Safety of FPSOs, Shuttle Tanker Collision Risk, Main report. Trondheim; NTNU; 2002 Oct. Report No. : MK/R 152.

Vinnem, J. E. , Aven, T. , Hundseid, H. , Vassmyr, K-A. , Vollen, F. et al. (2003a) Risk assessments for Offshore Installations in the Operational Phase. In: European safety and reliability conference 2003, Maastricht, The Netherlands.

Vinnem, J. E. , Hauge, S. , Seljelid, J. and Aven, T. (2003b) Operational Risk analysis—Total analysis of physical and non-physical barriers. Preventor, Bryne, Norway, Preventor Report 200254-03; 2003 16 October.

Vinnem, J. E. , Hokstad, P. , Dammen, T. , Saele, H. , Chen, H. , Haver, S. , et al. (2003c) Operational safety analysis of FPSO—Shuttle Tanker collision risk reveals areas of improvement, OTC paper 15317. OTC conference 2003; Houston, USA.

Vinnem, J. E. , Aven, T. , Hauge, S. , Seljelid, J. and Veire, G. (2004) Integrated Barrier Analysis in Operational Risk Assessment in Offshore Petroleum Operations. Proceedings of the international conference on probabilistic safety assessment and management PSAM7 and European safety and reliability conference; 2004 June 14-18; Berlin, Germany.

Vinnem, J. E. , Kvitrud, A. and Nilsen, L. R. (2006a) Stability failure for installations in the Norwegian sector (In Norwegian only). Stavanger; PSA. http://www. ptil. no/Norsk/-Helse+miljo+og+sikkerhet/HMS-aktuelt/6_stabilitet_risikoanalyser. htm

Vinnem, J. E. , Aven, T. , Husebø, T. , Seljelid, J. et al. (2006b) Major Hazard Risk Indicators for Monitoring of Trends in the Norwegian Offshore Petroleum Sector. Reliability Engineering and System Safety 91:778-791.

Vinnem, J. E. , Seljelid, J. , Aven, T. and Sklet, S. , (2006c) Analysis of barriers in operational risk assessment—a case study. In: Soares, C. (ed.). Proceedings ESREL 2006. Balkema, London.

Wiik, O. (2003) Private communication with Olav Wiik, Navion.

Øien, K., Sklet, S. and Nielsen, L. (1997) Risk Level Indicators for Surveillance of Changes in Risk Level. In: European safety and reliability conference 1997; Lisboa, Portugal.

Østby, E., Berg, M. and Festøy, B. (1987) Risk Assessment of Buoyancy Loss, Ballast System Failures and other Faulty Weight Conditions. DNV, Høvik, Norway; 1987 Jun. Report No.: 87-3451.

作者简介

简·埃里克·维南(Jan Erik Vinnem)博士是斯塔万格大学风险分析和管理专业教授,他还是挪威离岸业一家小型咨询公司——普利凡特公司的专家顾问兼首席执行官。其职业生涯包括在石油业度过约 6 年(挪威国家石油公司和道达尔公司)、在咨询业 20 多年(斯夫泰克·诺蒂克公司和普利凡特公司的创立者),以及在研究和教学领域的 7～8 年。维南博士参与并领导了大量与安全和风险相关的项目,近期的研发工作涉及决策支持工具、风险管理、风险接受、风险分析方法以及反映人员和组织因素的风险评估等。维南博士是《风险管理及在离岸石油业的应用》等书的作者,在风险评估和管理方面的国际期刊上发表了大量论文。

主审简介

陈刚教授，1962年出生于上海，1984年毕业于上海交通大学船舶及海洋工程系，1987年公派留学获日本政府奖学金，1993年于日本横滨国立大学获船舶海洋工程专业博士学位，1993年至1994年获JSPS日本学术振兴会外国人特别研究员计划资助，完成博士后研究。

历任上海浦东国际机场建设指挥部副总工程师、上海国际机场股份有限公司总工程师、上海市深水港工程建设指挥部副总工程师、上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院院长。现任上海交通大学副校长，享受国务院特殊津贴。

索 引

感谢以下单位对本书编译出版工作的大力支持

协办单位：

德国劳氏船级社（中国）有限公司

上海振华重工（集团）股份有限公司

公安部上海消防研究所

西南石油大学工程学院

中国石油大学（华东）

江阴市产品质量监督检验所

杭州电子科技大学

中海油能源发展股份有限公司监督监理技术分公司

东北石油大学石油工程学院

支持单位：

广东海洋大学

石油工业井控装置质量监督检验中心

国家海洋局第二海洋研究所

上海利策科技有限公司

中国石油大学石油工程学院

烟台大学

海洋石油工程（青岛）有限公司

集美大学轮机工程学院

媒体支持：

中国海洋工程网

[General Information]
书名=海洋工程设计手册－风险评估分册
页数=696
SS号=13276740